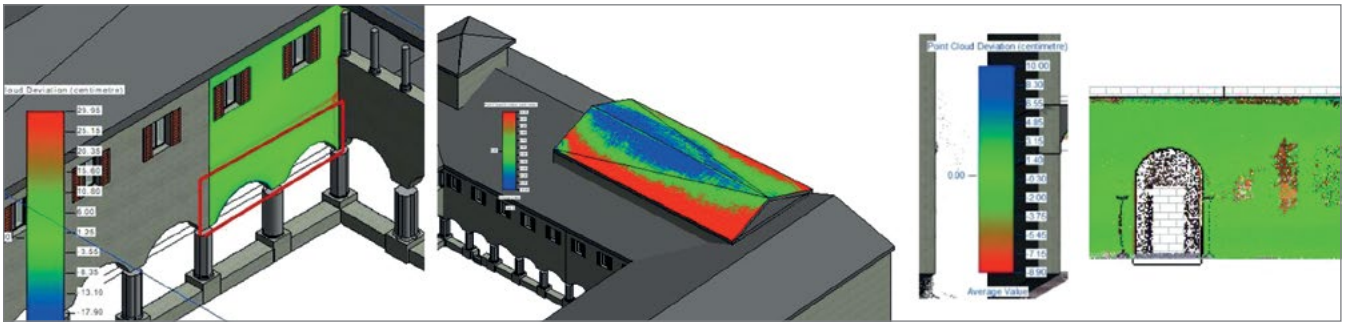
Applicazioni innovative di metodi di rilievo 3D ed esiti della modellazione

Innovative testings of 3D survey methods and modelling outcomes



ATTI E RASSEGNA TECNICA
DELLA SOCIETÀ DEGLI INGEGNERI E DEGLI ARCHITETTI IN TORINO
ANNO 152 - LXXIII - N. 3 - DICEMBRE 2019

Verifiche dell'affidabilità del modello HBIM rispetto alle nuvole fotogrammetriche del chiostro di San Nicola a Tolentino (da Raffaella Stano, Acquisizioni multi-sensore nel chiostro di San Nicola a Tolentino per il modello parametrico*, tesi di laurea, cit.)*

Mappe di superficie 3D e ortofoto di centri colpiti dal terremoto 2016-17 in Centro Italia

3D surface maps and orthophotos of centres affected by the 2016-17 earthquake in Central Italy

Nelle prossime pagine sono riportati i modelli digitali di superficie (DSM *Digital Surface model*) e relative ortofoto derivate dai voli fotogrammetrici eseguiti mediante UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) ad ala fissa o multirotore, realizzati nei centri di Accumoli, Amatrice, Norcia e Pescara del Tronto, nell'arco temporale tra ottobre 2016 e gennaio 2017.
Le strategie di ripresa, la georeferenziazione dei blocchi di immagine, le modalità di calcolo e molti altri aspetti sono riferiti e discussi nei rispettivi contributi del volume. Le didascalie delle immagini riportano i dati tecnici essenziali per poter valutare il corretto uso dei prodotti.
I modelli digitali di superficie e le ortofoto dei centri colpiti, compresi altri relativi a epoche diverse o di diversi luoghi che non fanno parte della seguente selezione, sono stati generati per molte ragioni. Uno degli scopi è stato ovviamente fornire i prodotti finali alle comunità ed enti locali interessati; inoltre i droni impiegati, i dati acquisiti e i prodotti finali sono stati condivisi con il Corpo Nazionale dei Vigili del fuoco, squadra SAPR (Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto). Le fasi di elaborazione e calcolo dei DSM e ortofoto infine, si sono susseguite più volte in occasioni formative, consentendo a numerosi studenti del Politecnico guidati dai tutors di sperimentare le fasi operative, divenendo anche parte integrante di tesi di laurea. La sequenza dei prodotti fotogrammetrici delle prossime pagine è stata processata da Lorenzo Teppati Losè e da Giulia Sammartano.
Gli UAV impiegati per la realizzazione dei prodotti delle pagine successive sono i seguenti:

- la piattaforma Ebee classic (Sensefly) ad ala fissa, con camera Canon IXUS 127 HS, sensore CMOS da 1/2.3", risoluzione 16.1 MP (Gruppo SAPR dei Vigili del Fuoco) e con camera Canon Power Shot S110 che monta un sensore CMOS da 1/1.7", risoluzione 12 MP (Team DIRECT del Politecnico di Torino) per i voli fotogrammetrici di Pescara del Tronto e Norcia;
- il sistema multi-rotore Inspire 1, quadricottero prodotta da DJI, con camera con camera FC550 15 Mp, oppure camera ILCE-5100, risoluzione 24 Mp, (Gruppo SAPR dei Vigili del Fuoco e Team DIRECT del Politecnico di Torino) per i voli fotogrammetrici di Accumoli e Amatrice.

Pescara del Tronto (Comune di Arquata del Tronto, AP)

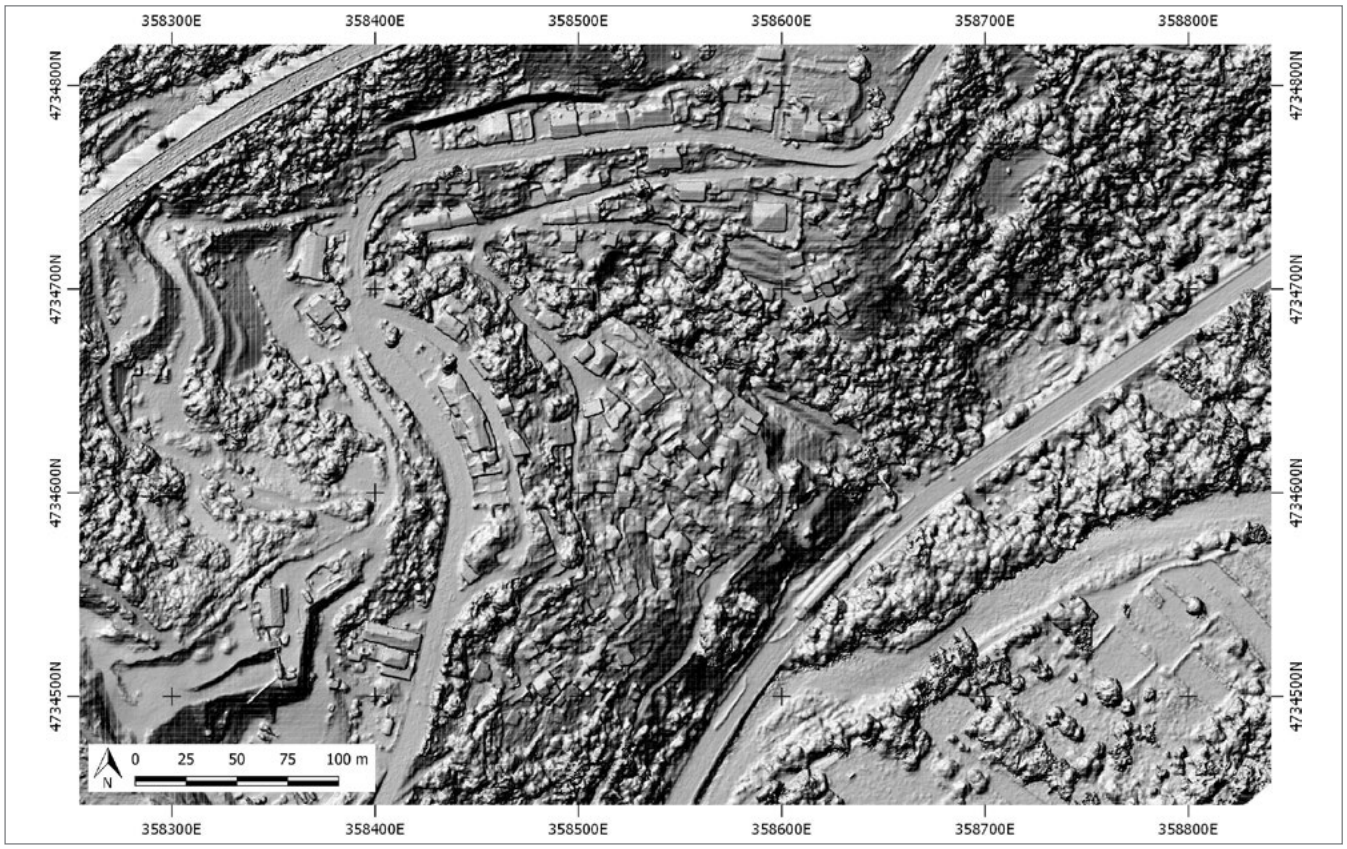


Figura 1. Modello Digitale di Superficie. Acquisizione dati: Ottobre 2016. Ground Sampling Distance *GSD (dimensione del pixel a terra): 14 cm/pixel. Accuratezza media stimata su* Ground Control Points *GCP: 4,8 cm. Estensione del modello: 0,8 Km².*

Figura 2. Ortofoto. Acquisizione dati: Ottobre 2016. Ground Sampling Distance *GSD: 7 cm/pixel. Accuratezza media stimata su* Ground Control Points *GCP: 4,8 cm. Estensione del modello: 0,8 Km².*

Accumoli (RI)

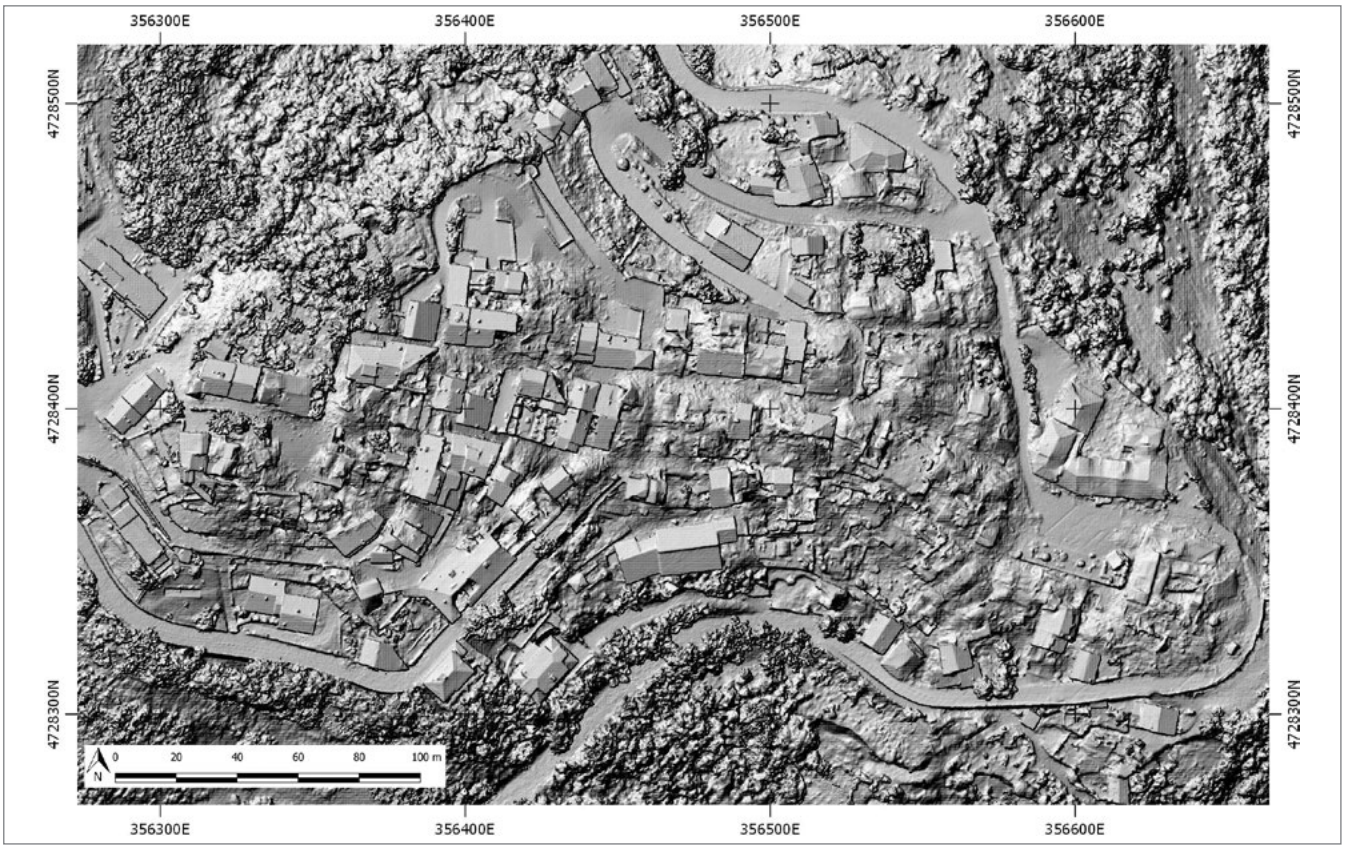


Figura 3. Modello Digitale di Superficie. Acquisizione dati: Dicembre 2016. Ground Sampling Distance *GSD: 7 cm/pixel. Accuratezza media stimata su* Ground Control Points *GCP: 3,5 cm. Estensione del modello: 0,2 Km²*.

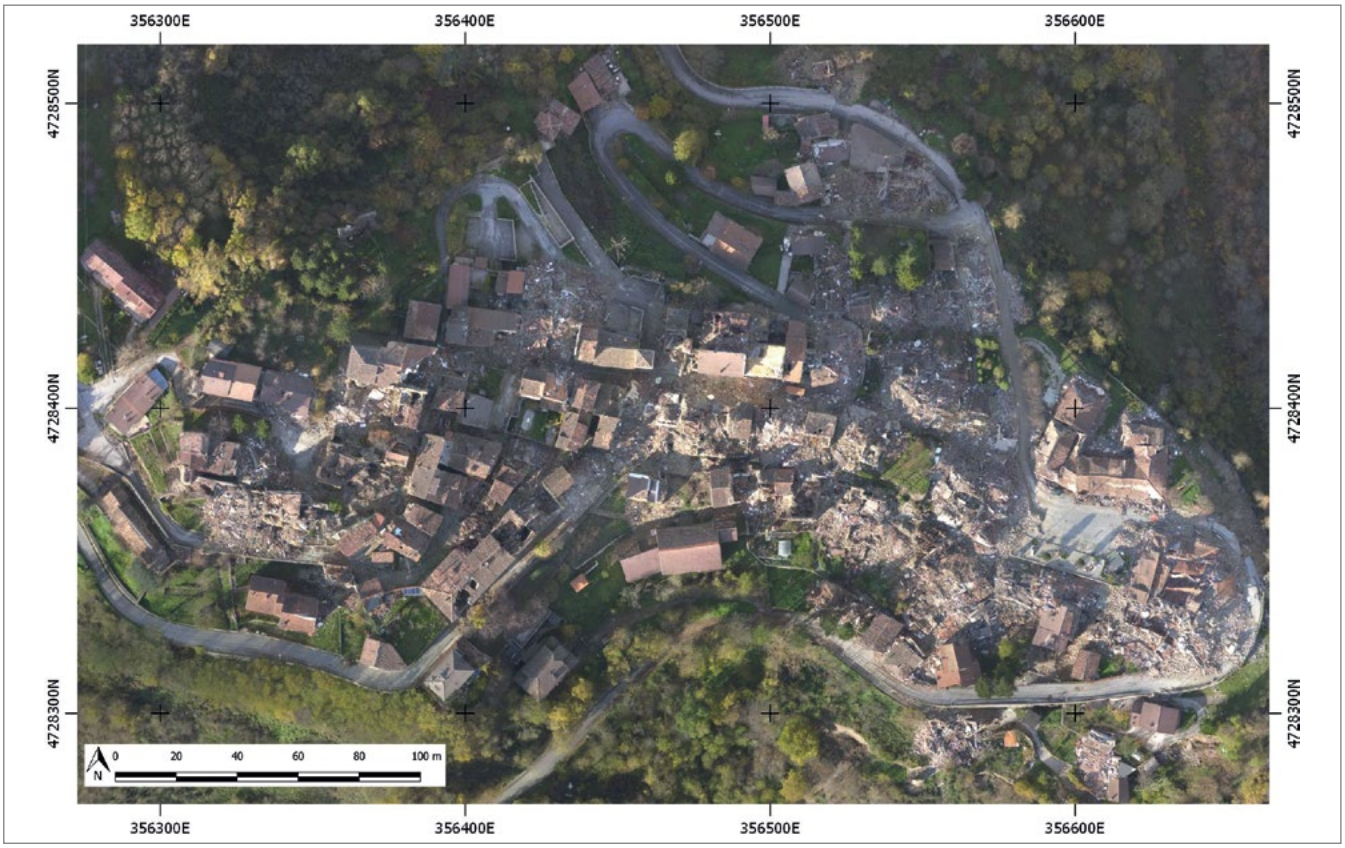


Figura 4. Ortofoto. Acquisizione dati: Dicembre 2016. Ground Sampling Distance *GSD: 3,6 cm/pixel. Accuratezza media stimata su* Ground Control Points *GCP: 3,5 cm. Estensione del modello: 0,2 Km²*.

Amatrice (RI)

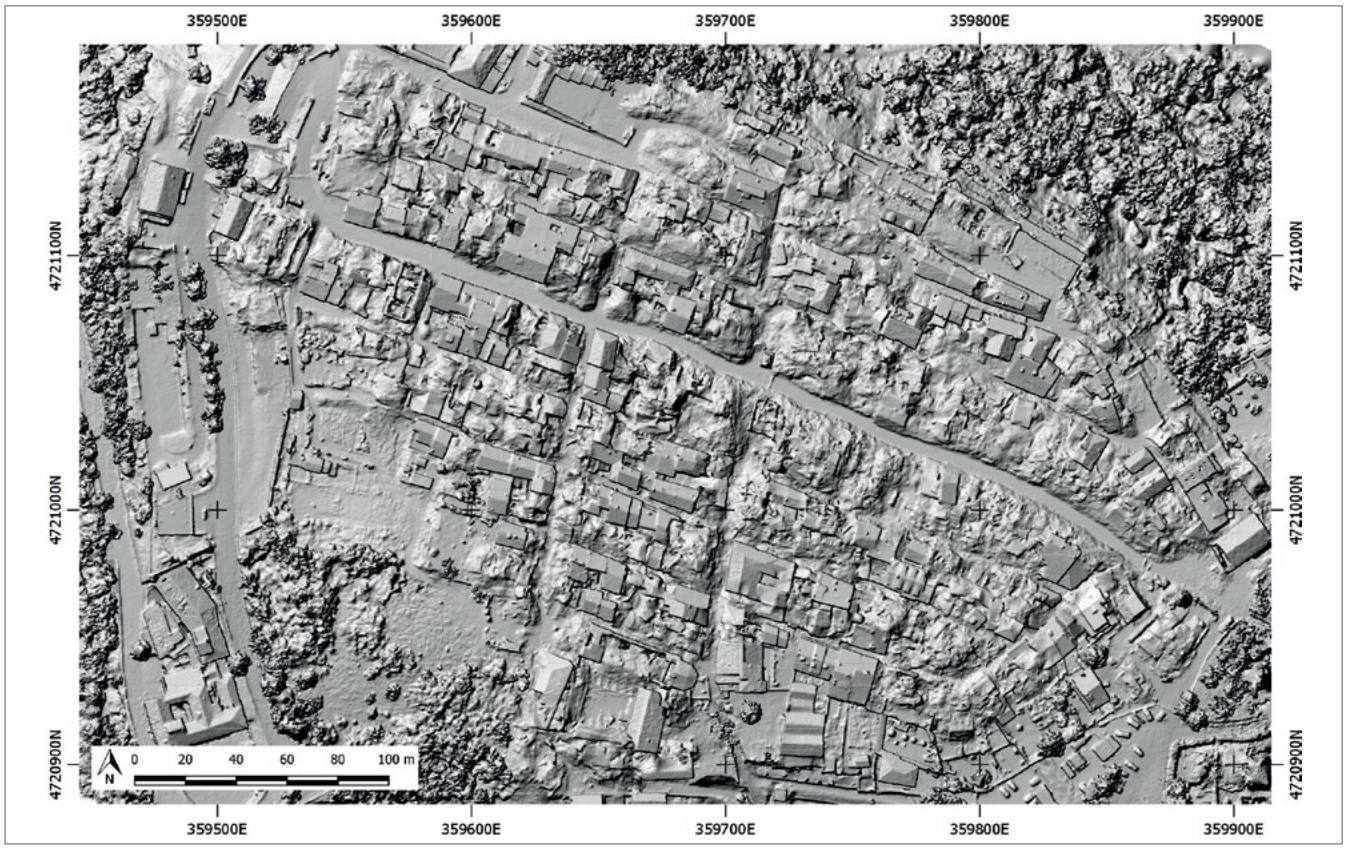


Figura 5. Modello Digitale di Superficie. Acquisizione dati: Dicembre 2016. Ground Sampling Distance *GSD: 10 cm/pixel. Accuratezza media stimata su* Ground Control Points *GCP: 0,8 cm. Estensione del modello: 0,3 Km².*

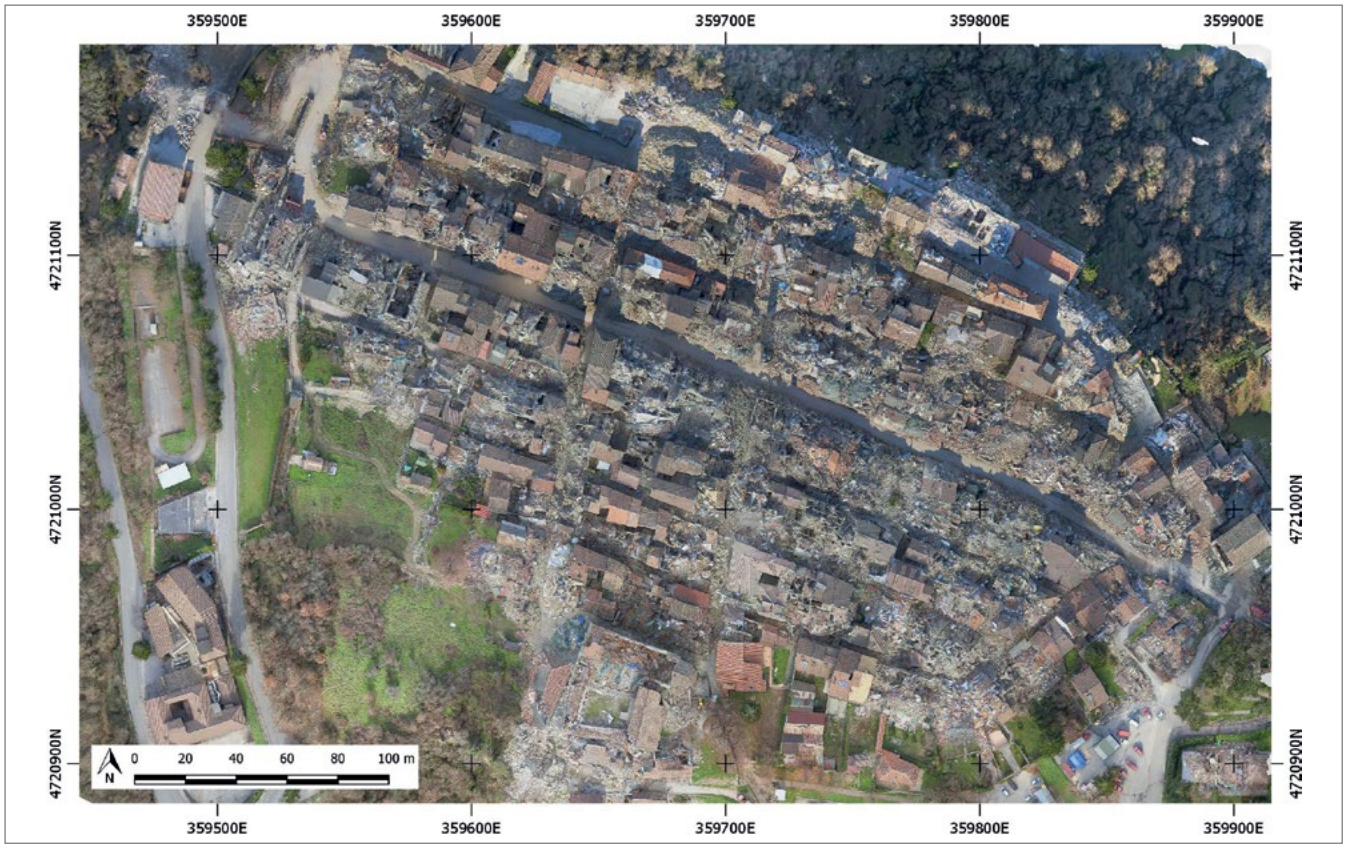


Figura 6. Ortofoto. Acquisizione dati: Dicembre 2016. Ground Sampling Distance *GSD: 2,6 cm/pixel. Accuratezza media stimata su* Ground Control Points *GCP: 0,8 cm. Estensione del modello: 0,3 Km².*

Norcia (PG)

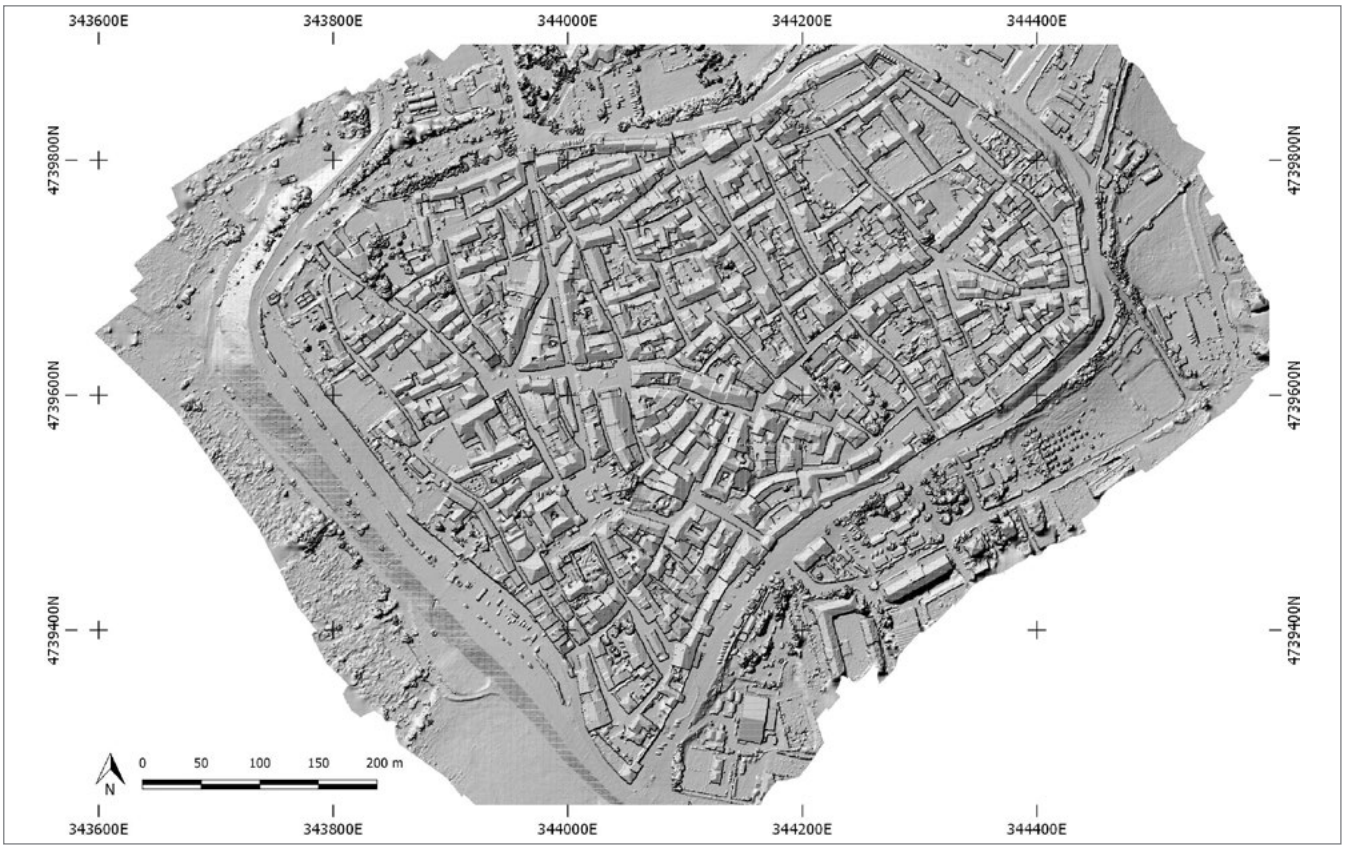


Figura 7. Modello Digitale di Superficie. Acquisizione dati: Gennaio 2017. Ground Sampling Distance *GSD: 6 cm/pixel. Accuratezza media stimata su* Ground Control Points *GCP: 2,8 cm. Estensione del modello: 0,5 Km².*

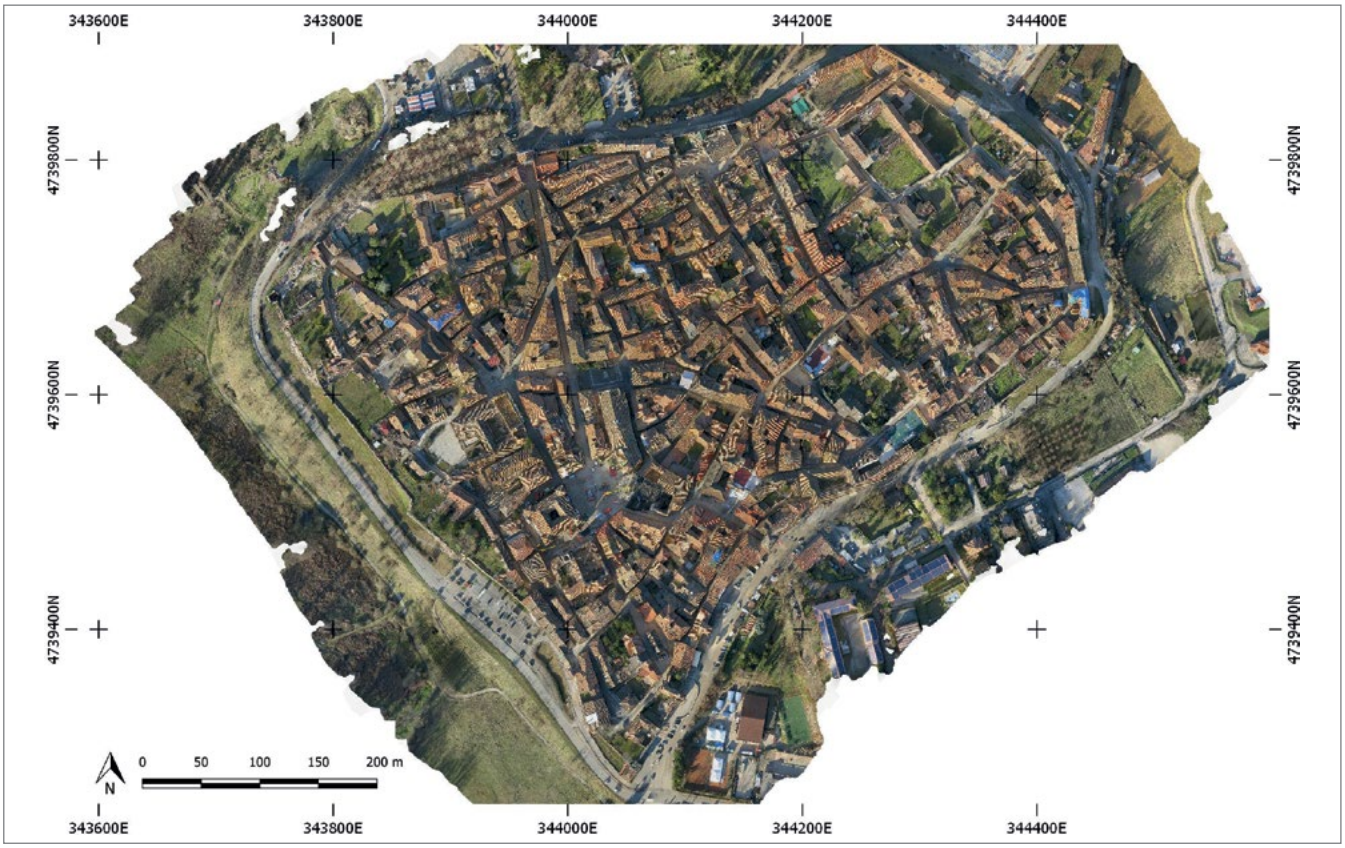


Figura 8. Ortofoto. Acquisizione dati: Gennaio 2017. Ground Sampling Distance *GSD: 3 cm/pixel. Accuratezza media stimata su* Ground Control Points *GCP: 2,8 cm. Estensione del modello: 0,5 Km².*

BY-NC-SA

Rilievi integrati UAV e terrestri, basati su tecnologia SLAM, a Pescara del Tronto
Integrated UAV and terrestrial 3D SLAM-based mapping in Pescara del Tronto village

GIULIA SAMMARTANO

Giulia Sammartano, dottore di ricerca in Beni architettonici e paesaggistici, assegnista in Geomatica presso il Politecnico di Torino, DAD
giulia.sammartano@polito.it

Abstract
L'integrazione di dati fotogrammetrici e laser scanning, nel contesto dei sistemi rapidi, e l'ottimizzazione di modelli 3D da essi derivati è stata oggetto della tesi di dottorato dell'autrice[1]. Il presente contributo è una sintesi estremamente schematica di un caso applicativo scelto e affrontato nella tesi perché emblematico dell'integrazione e la validazione di modelli derivati dalla fotogrammetria UAV e dai sistemi mobili di scansione, in particolare gli scanner portatili basati sulla tecnologia SLAM. Il punto di vista aereo infatti è quello proposto e ampiamente validato in caso di criticità che interessano il contesto al suolo, o nel caso l'accesso agli spazi per via terrestre non sia consentito, nel qual caso l'approccio range-based (scansioni laser) viene proposto e validato congiuntamente.

The integration of photogrammetric and laser scanning data, in the context of rapid mapping, and the optimization of derived 3D models was the subject of the author's doctoral thesis. This contribution is an extremely schematic summary of case study chosen and addressed in the thesis because it is emblematic of the integration and validation of models derived from UAV photogrammetry and mobile scanning systems, in particular portable scanners based on SLAM technology. The aerial point of view indeed is the one proposed and widely validated in case of critical issues affecting the ground-related context, or if the access to spaces by land is not allowed, in which case the range-based handheld mapping system is proposed and jointly validated.

Introduzione
Una delle sfide più importanti della Geomatica applicata al Disaster Management (DM) e al pronto intervento nel caso di calamità naturali, come nel caso degli eventi sismici che hanno colpito le aree del centro Italia tra la fine del 2016 e l'inizio 2017, è quello di fornire soluzioni operative versatili ed efficaci a supporto del rilievo speditivo del danno. Inoltre, un'attenzione particolare deve essere posta anche a grande scala nel caso in cui si parli di esempi di patrimonio culturale di sensibile valore storico così come di aree diffuse di tessuto appartenente al patrimonio urbano denso e stratificato. Quando ci si confronta in maniera tangibile con scenari post-disastro e ci trova a operare in un'eredità profondamente ferita e ripetutamente distrutta come quello del centro di Pescara del Tronto, frazione di Arquata del Tronto (AP), si percepiscono gli aspetti cruciali benché controversi del lavoro sul campo, che riguardano la presenza di operatori nei momenti di ispezione in differenti condizioni di esposizione al rischio (Figura 1).

Figura 1. Un momento dell'acquisizione dati del gruppo di Geomatica nella Missione della Task Force a ottobre 2016.

Esperti del corpo di Protezione Civile e Vigili del Fuoco, nonché specialisti tra cui ingegneri, sismologi, tecnologi geomatici, progettisti e restauratori si trovano spesso coinvolti, in tempi e approcci nonché con contenuti differenti, ad agire su ciò che resta dei luoghi e delle strutture da mettere in sicurezza, misurare, consolidare, demolire, smaltire, restaurare, riprogettare.

1. Sistemi di rapid mapping per modelli *reality-based* e *user-oriented*: fotogrammetria UAV e scanner portatili

L'opportunità di beneficiare del contenuto informativo metrico e della navigazione diretta 2D e 3D di modelli digitali da rilievo reality-based ad alta risoluzione e con alto grado di accuratezza, tramite, ad esempio, dispositivi portatili e interfacce 3D, sembra una promessa possibile per un futuro non così lontano. Il primo passo è senz'altro lavorare nella direzione dell'ottimizzazione dei workflow operativi di misura del costruito alla scala urbana e integrazione dei dati per la derivazione di informazioni. Infatti, nell'ambito delle sperimentazioni di Geomatica condotte nei mesi del sisma è stato importante testare la competitività di metodi e tecnologie alternative per l'acquisizione speditiva di dati 3D e la creazione e l'ottimizzazione di modelli multi-contenuto, multi-scala e multi-temporali che possano essere una base conoscitiva completa di informazioni.

Sicuramente la direzione dell'evoluzione tecnologica delle metodologie di digitalizzazione predilige, come già ampiamente affrontato in questo volume, in questi scenari metodologie cosiddette di *rapid mapping*[2]: fotogrammetria digitale da drone[3] equipaggiato con camere e sensori ad alta risoluzione (Figura 2), o da terra con camere COTs (*commercial off-the-shelf*) reflex o compatte (Figura 3), oppure ancora sistemi portatili di mobile mapping (MMSs)[4] basati su una fusion di sensori LiDAR e di posizionamento. Essi sono di agevole impiego e solitamente più economici rispetto ad approcci più consolidati di tipo statico, ad alta risoluzione e densità di punti e quindi non competitivi nel bilancio dei costi complessivi: tempo, risorse, risultati. Qui infatti il concetto di efficacia del rilievo è ancora più rilevante nella scelta dell'approccio da praticare e la validità non è soltanto funzione alla qualità del contenuto metrico atteso ma piuttosto della ricchezza di dati multi-scala, e in ogni caso risultato di una sinergia di fattori: la densità e accuratezza del dato, le abilità idonee dell'operatore esperto, l'investimento tecnologico richiesto e il tempo impiegato.

In particolar modo quello che è possibile affermare grazie agli sforzi di ricerca direzionati verso il perfezionamento e la sempre maggiore automazione dei processi di trattamento dati, è che la finalizzazione dei modelli *reality-based* passi attraverso due fasi cruciali e correlate: approssimazione e interpretazione. Questo è auspicabile possa poi ottimizzare i protocolli reali operativi di l'acquisizione e gestone dati stessa nel momento del pronto intervento.

La grande quantità di dati acquisiti dalle tecnologie digitali di rapid mapping e il concetto di approssimazione, strettamente connesso alla scala e a un contenuto di informazioni atteso, porta altresì a concepire l'accuratezza richiesta del prodotto metrico, e con essa le procedure robuste di verifica e validazione. Per questo lo stadio di approssimazione dei contenuti geometrici e radiometrici deve sempre essere condotta alla luce dal processo interpretativo *user-oriented*, che dall'altro lato, prevede senz'altro come necessario il filtro degli approcci metodologici coinvolti che beneficiano del valore aggiunto del modello digitale, tanto più in contesti applicativi come quello emergenziale qui affrontato.

Le informazioni sono derivabili dai modelli metrici e dalle loro elaborazioni, che si presentano sotto varia forma, a partire da nuvole di punti, modelli continui di superficie 3D (mesh), oggetti vettoriali corrispondenti a profili di sezione, prodotti raster continui come modelli di superficie (DSM/DEM). Per ognuno di essi, algoritmi automatici o semi-assistiti di segmentazione, classificazione, filtraggio, interpolazione, vettorializzazione, analisi di deviazione, analisi spaziali e differenze multi-temporali permettono di estrarre un valore aggiunto intrinseco alle ricostruzioni continue 3D multi-scala e multi-contenuto[5] (Figura 3).

Esse possono essere quantitative e misurabili, e possono concernere: la ricostruzione geometrica 3D dell'oggetto o del complesso urbano; la modellazione e analisi del suo intorno, come l'andamento del terreno e micro-topografia; l'analisi della geometria in relazione alla sua struttura e dei suoi fenomeni deformativi associabili ad anomalie della morfologia originaria e delle geometrie generative (planarità orizzontali, verticalità, fuoripiombo di muri, torri, campanili, curvature di volte ecc.); ispezioni anche visive e qualitative relative agli attributi radiometrici intrinsechi al contenuto metrico di ortofoto e texture ad alta risoluzione, da cui derivare informazioni sulle condizioni di superficie (quadro fessurativo, materiali e patologie, degradi, ispezione delle coperture ecc.).

In seguito ne verranno richiamati alcuni esempi.

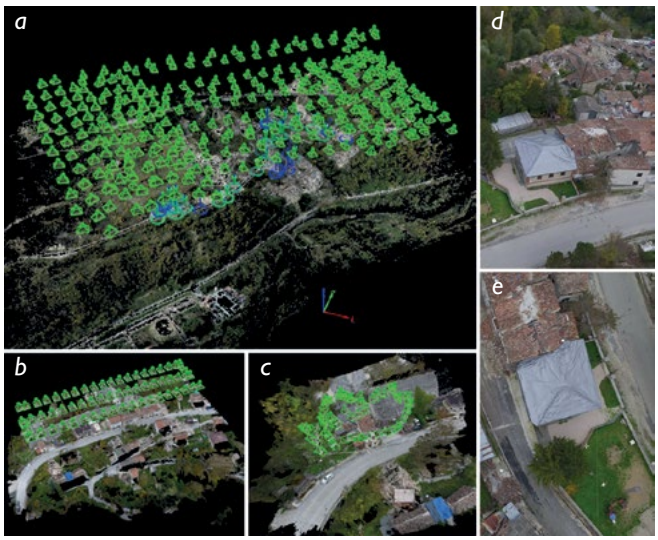


Figura 2. Acquisizioni fotogrammetriche da UAV. (a) il volo eBee nadirale su tutto il paese; (b, c) esempi di voli localizzati al blocco nord, e all'edificio n°5 in modalità obliqua manuale. (d) immagine obliqua; (e) immagine nadirale.

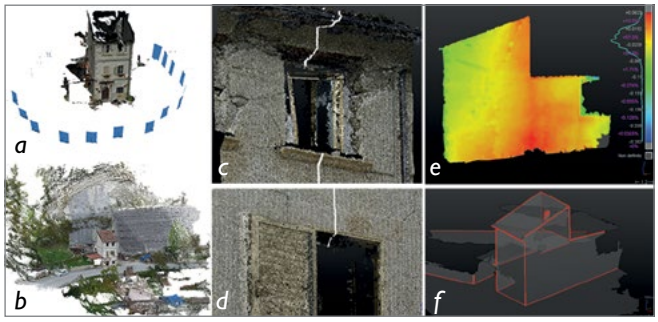


Figura 3. (a) immagini orientate da DSLR; (b) modello di punti integrato terrestre e da UAV alla scala dell'edificio. (c) nuvola di punti ad alta risoluzione e (d) lettura del profilo di sezione lungo le aperture; (e) confronto tra la superficie della muratura e un piano verticale, (f) estrazione di piani per modello di superficie derivato semplificato.

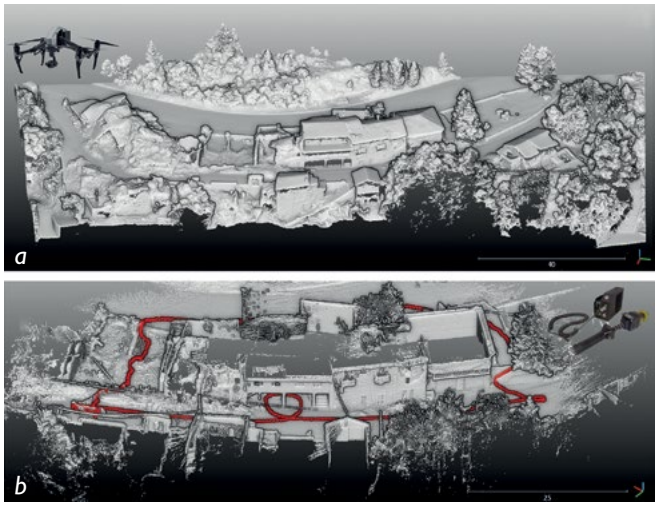


Figura 4. Confronto tra modelli: (a) nuvola DSM del volo fotogrammetrico UAV; (b) mappatura 3D da ZEB1 mobile mapping system con visibilità della traiettoria percorsa, in rosso.

2. Il ruolo dei modelli 3D. Il caso di Pescara del Tronto

È ben noto come il processo interpretativo delle condizioni di emergenza e danno nelle prime fasi di intervento è normato da procedure standard piuttosto condivise[6]. Esso è oggi largamente basato su mappe preliminari di fotointerpretazione a medio-piccola scala da dati aerei e satellitari, e solo recentemente con la sperimentazione di immagini da drone equipaggiato con camera ad alta risoluzione (Emergency Mapping Service – EMS[7]) e poi sull'ispezione visuale in-situ delle tracce osservabili e quindi definito da scale di valori che relazionano empiricamente l'intensità sismica con il grado di danno visibile. Nel panorama europeo esiste una duplice scala: *European Macroseismc Scale - EMS98*[8] e la *Copernicus EMS*, impiegata durante le attivazioni di rapid mapping; di particolare interesse, in quello italiano, *Schede AeDES*[9] e *Schede ministeriali A-DC* e *B-DP*[10] per chiese ed edifici in muratura. Relativamente alle fasi di protocolli standard successive, del rilievo del danno a grande scala e della conseguente produzione di documentazione metrica a supporto delle analisi di vulnerabilità per la pianificazione delle direttive di intervento, il ruolo dei modelli 3D integrati della geomatica può essere cruciale e sempre più può contribuire alla valutazione del rischio e vulnerabilità sismica[11]. Le principali informazioni che devono essere derivate dalle ispezioni sul campo sono i vincoli di agibilità negli spazi e delle vie di collegamento al centro urbano e agli aggregati interni, e le condizioni statico strutturali degli edifici.

Nel centro abitato di Pescara del Tronto sono state compiute le già presentate missioni di rilevamento estensivo principalmente di tipo fotogrammetrico da UAV[12] del borgo e del suo intorno dato dalla sua particolare posizione e conformazione topografica (Figura 2). Non si è comunque esclusa la potenzialità di integrare ad essi e valutare dati 3D acquisiti da terra tramite sistemi speditivi avanzati di tipo *image-based* (Figura 3) e *range-based da tecnologie SLAM* (Figura 4), e su questo si è avviato l'indirizzo di una ricerca specifica[13].

A causa delle ripetute scosse che hanno fortemente avanzato lo stato di danno e i livelli di collasso progressivi e diffusi, sono proseguite le operazioni di volo in chiave multi-temporale e sono stati quindi raccolti datasets coregistrati[14] riferiti alle condizioni di agosto, settembre, fine ottobre, e dicembre 2016, successivi gli eventi sismici principali occorsi. La caratteristica dei voli eseguiti è sicuramente quella di essere, come già introdotto[15], multi-scala perché derivati da piattaforme diverse con varie camere e altrettante condizioni di volo. Per richiamare lo scenario progettuale dei rilievi:

- i voli complessivi sull'abitato e le vie di comunicazione sono stati eseguiti con il superleggero *eBee di SenseFly* con tre blocchi di fotogrammi (Figura 2a) e una risoluzione del pixel a terra (il GDS: *Ground Sample Distance*) di circa 5cm/px;
- i voli a scala maggiore dedicati alla documentazione dei 3 blocchi principali, nella forma di isolati, con un drone multirotore *Inspire 1 DJI* di proprietà del gruppo SAPR

Figura 5. Modello 3D mesh texturizzato derivato da fotogrammi orientati acquisiti con drone Inspire 1 del gruppo VVF relativo a fenomeni di danni e crolli nell'area sud.

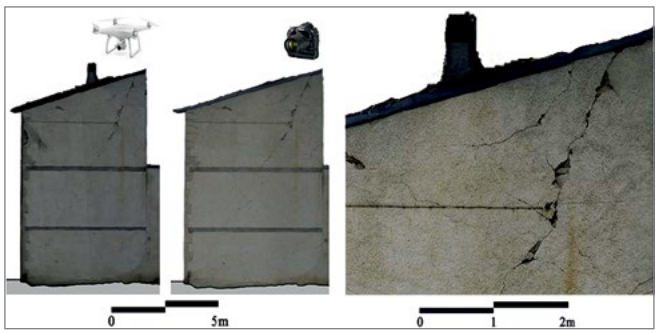


Figura 6. Lettura delle fessurazioni su ortofoto digitale del fronte laterale est da modello 3D calcolato, con fotogrammetria UAV (a), terrestre (b), e con loro integrazione (c).

dei Vigili del Fuoco[16], garantendo una risoluzione a terra di circa 2 cm/px. Il blocco *nord* era disposto lungo la via di accesso alla città, in un'area pressoché piana ma addossata a una grande parete di roccia su cui si imposta il viadotto. Il blocco *centrale* (Figura 2b, d, e) era costituito da un isolato racchiuso tra le due strade a differente quota con un dislivello di quasi 2 m e che connettono l'area nord e sud del paese. Il blocco *sud* si trovava in un'area topograficamente complessa con edifici disposti a quote diverse e su terreni in discesa;

- i voli a grande scala su singoli edifici (Figura 2c) che sono stati eseguiti con volo manuale pianificato nadirale e obliquo con il quadricottero *Phantom 4 DJI*. Con una quota di volo di circa 20-25 m, il risultato finale del modello è stato un GSD=0,01m con una accurata radiometria.

Da questi modelli 3D ad alto contenuto metrico e radiometrico, e in particolare attraverso la lettura della *texture* ad alta risoluzione, possono essere potenzialmente derivabili informazioni utili ad arricchire la lettura interpretativa della condizione strutturale degli edifici post-sisma (Figura 3), oltre che dati metrici accurati come pendenze, dislivelli, profili di piante e sezioni complessive e continue di edifici, crolli (Figure 5, 8c), quantificazione volumetriche di macerie e verifica delle connessioni con il terreno, fessurazioni (Figura 6), comparabili con la scala di rappresentazione compresa tra 1:50 per i voli a grande scala, e 1:100-1:200 per i voli a quote maggiori[17].

La ricerca è stata condotta[18], nello specifico, nella direzione di integrare i dati a grande scala originati da un punto di vista tipicamente aereo, benché 3D e completo in quanto derivato da acquisizioni nadirali e oblique (Figura 4a) con i dati di tipo terrestre rapidi e continui a grande scala, derivanti da una mappatura da MMS (Figura 4b). In questa sperimentazione è stato impiegato lo ZEB1 un sistema portatile commercializzato da GeoSLAM™ a partitre dal prototipo Zebedee che si basa su uno sviluppo dell'algoritmo SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*). La testa rotante del sistema, emette continuativamente un raggio 2D laser durante l'acquisizione (Hokuyo UTM-30LX) e parallelamente la sensoristica inerziale IMU, con giroscopio, accelerometro e magnetometro, contribuisce alla stima del tracciamento della traiettoria percorsa dall'operatore che trasporta manualmente lo strumento. L'algoritmo interviene nella soluzione del problema di posizionamento in assenza di sensori GNSS. Durante l'acquisizione in ambienti geometricamente complessi e caratterizzati, la capacità dell'algoritmo SLAM di allineare i profili estratti a quelli precedenti continuativamente, con una sorta di metodo di triangolazione inversa, aiuta il sistema a stimare la posizione del centro dello strumento e quindi della traiettoria. Essa sarà tanto ottimizzata quanto più si percorrono tratti comuni di percorso e si torna in chiusura nel punto di partenza.

Grazie alla sua portabilità, a mano o montato su dispositivi mobili, e al suo raggio massimo di acquisizione di circa 30 m in ambienti interni o esterni racchiusi e circa 15 m in esterni ampi e aperti, il sistema ZEB1 ha calcolato a Pescara del Tronto, ad esempio nel blocco centrale (Figura 4b), una nuvola di punti densa di circa 20.000 pt/m^3 in una traiettoria eseguita lungo 200 m, nel corso di circa 10min con una velocità raccomandata non superiore a 0,5m/sec (14,5 mln di punti in totale).

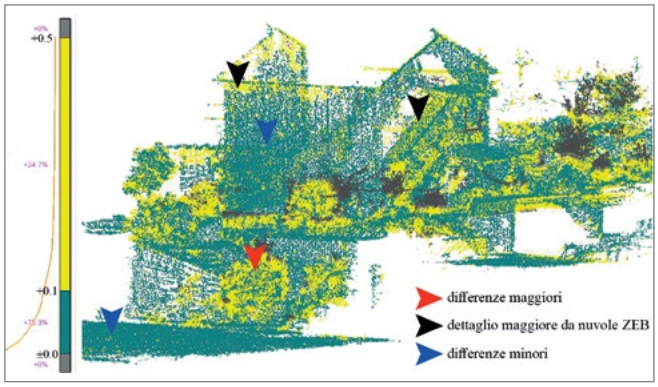


Figura 7. Analisi comparativa tra le due nuvole di punti DSM da UAV e SLAM-based. La mappa di deviazione evidenzia, in verde i punti con minore errore 0,0<74,5%<0,10m, e in giallo le aree di maggior scostamento 0,01<24,7%<0,5m.

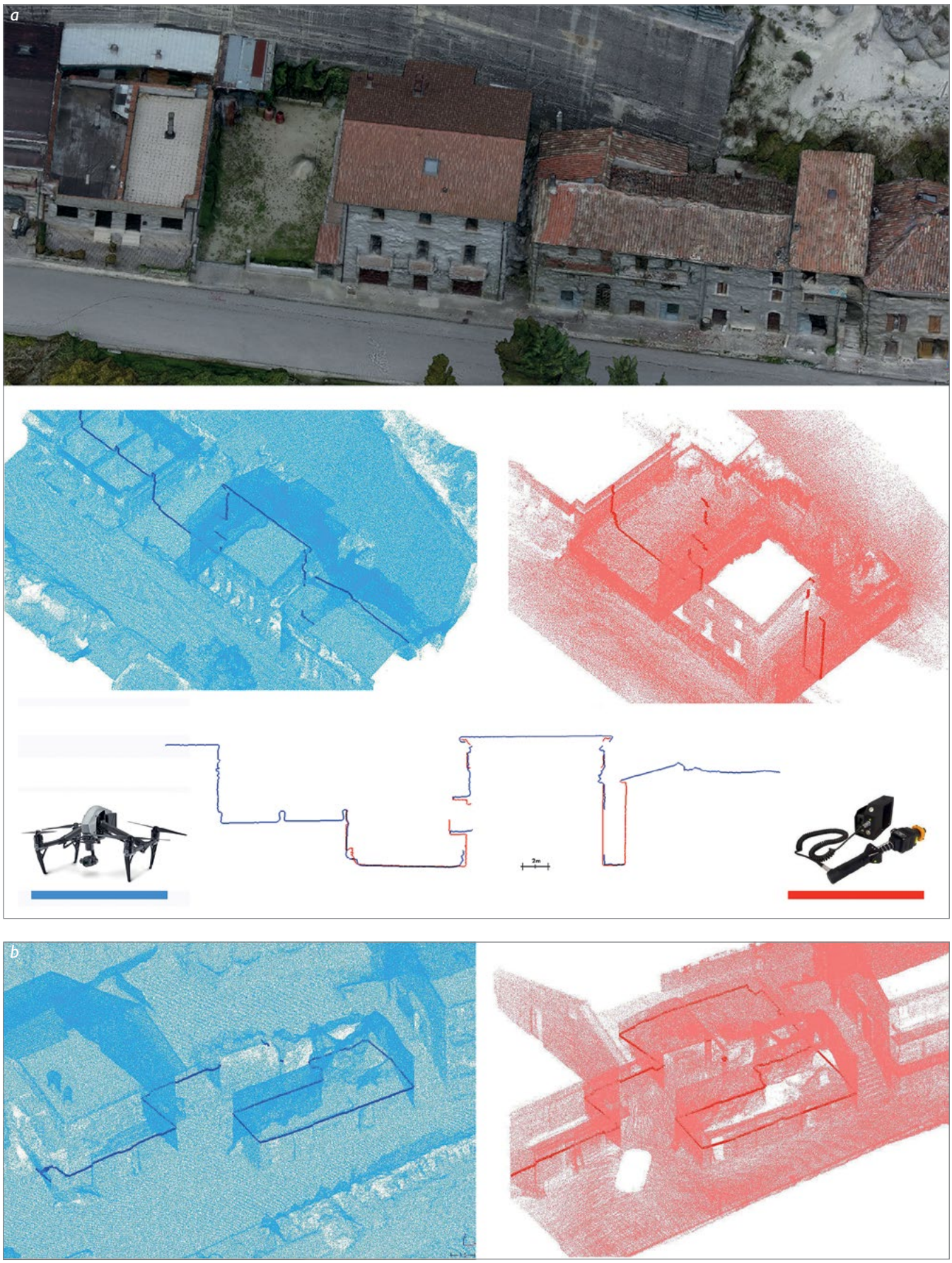
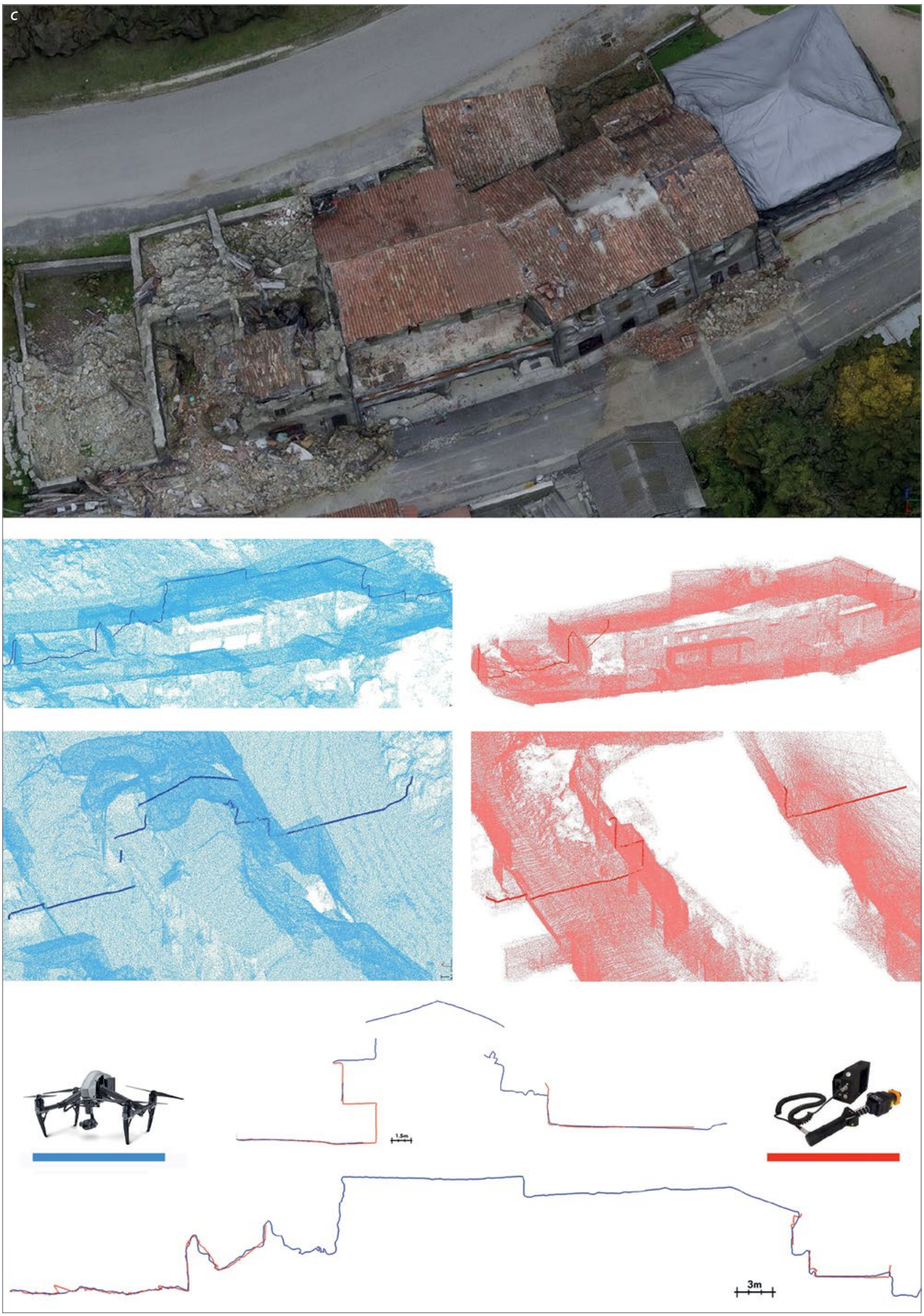


Figura 8. Confronto di DSM e di profili di sezione estratti dai due modelli 3D UAV e ZEB1, derivanti dalla differente accessibilità e visibilità degli spazi per: (a) l'area nord, sezione longitudinale; (b) area sud, sezione orizzontale, riferita al blocco di Figura 5; (c) blocco centrale, sezione longitudinale e trasversale.


c
1.5m
3m

3. Valutazione e validazione dei modelli 3D

Relativamente al contenuto metrico dei dati 3D dei due modelli, il livello di dettaglio raggiunto puntualmente dal laser portatile ZEB1 è competitivo e nettamente maggiore del modello di superficie ricostruito dalla mappatura da drone, benché non risulti continuo e inoltre è incompleto delle superfici di coperture.

Infatti da un confronto metrico di due nuvole sull'area di un edificio del blocco sud, caratterizzato da una complessità topografica notevole, emerge come, quasi il 75% della nuvola da scanner mobile risulti coincidente alla nuvola UAV entro il valore di 0,1 m[19]. Per il resto, a esclusione delle grandi differenze superiori a 0,1 m nelle aree arboree circostanti, causate dal rumore della nuvola (errore accidentale), la nuvola ZEB dimostra di essere caratterizzata da un maggior dettaglio della prima, attribuibile al punto di vista privilegiato terrestre, come l'area sotto le falde in connessione con il tetto, e l'ingresso porticato della casa.

L'integrazione delle due soluzioni tecnologiche quindi risulta vantaggiosa e sicuramente privilegiata rispetto a soluzioni tradizionalmente più statiche in riferimento al loro contenuto informativo metrico. La mappatura speditiva con uno scanner portatile come lo ZEB1, nell'ambito di una documentazione di questo tipo alla scala urbana, a confronto con una mappatura da drone, o a integrazione di questa (Figura 8a, b, c), può infatti contribuire in maniera significativa ad arricchirne i contenuti 3D da terra nelle aree significative, ammettendo l'accessibilità, anche limitata, di tali aree. Infatti le risorse di tempo sfruttate possono essere ridotte alla durata del cammino per la prima sola imprescindibile ispezione sui luoghi, massimizzando l'acquisizione di dati spaziali geometrici, e limitando così eventuali altri accessi e permanenze prolungate nei luoghi e quindi l'esposizione al rischio.

Note

[1] Giulia Sammartano, *Suitability of 3D dense models from rapid mapping strategies for Cultural Heritage documentation and conservation. Validation of metric and non-metric information extraction from integrated solutions*, tesi di dottorato di ricerca in Beni architettonici e paesaggistici, Politecnico di Torino, XXX ciclo (2018), tutors Nannina Spanò, Filiberto Chiabrando.

[2] Cfr. in questo volume il contributo a p. 41.

[3] Piero Boccardo, Filiberto Chiabrando, Furio Dutto, Fabio Giulio Tonolo, Andrea Lingua, *UAV Deployment Exercise for Mapping Purposes: Evaluation of Emergency Response Applications*, in «Sensors», 15 (7), 2015, pp. 15717-15737.

[4] Erica Nocerino, Fabio Menna, Fabio Remondino, Isabella Toschi, Pablo Rodríguez-Gonzálvez, *Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mobile mapping systems*, in *Proceedings of SPIE 10332, Videometrics, Range Imaging, and Applications XIV*, 103320I, June 2017; DOI:10.1117/12.2270761.

[5] Giulia Sammartano, *Suitability*... cit.

[6] Cfr. in questo volume il contributo a p. 32.

[7] Silvana Cotrufo, Constantin Sandu, Fabio Giulio Tonolo, Piero Boccardo, *Building damage assessment scale tailored to remote sensing vertical imagery*, in «European Journal of Remote Sensing», 51(1), 2018, pp. 991-1005.

[8] EMS89, Gottfried Grünthal, *European Macroseismic Scale 1998*, European Seismological Commission (ESC), 1998.

[9] Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile, *Manuale per la compilazione della scheda di 1° livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sisma*, AeDES, Roma 2009.

[10] Schede ministeriali A-DC e B-DP (Ministero dei Beni e delle Attività culturali e del Turismo, Direttiva 12 dicembre 2013, relativa alle «Procedure per la gestione delle attività di messa in sicurezza e salvaguardia del patrimonio culturale in caso di emergenze derivanti da calamità naturali».)

[11] Questi temi sono stati anche approfonditi in Edoardo Fillia, *Modelli 3D per la valutazione della vulnerabilità sismica delle chiese in muratura storica. Il caso studio di Sant'Andrea a Campi di Norcia*, tesi di laurea magistrale in Architettura per il Restauro e la valorizzazione del patrimonio, Politecnico di Torino, relatori Nannina Spanò, Cesare Tocci, Giulia Sammartano, febbraio 2020.

[12] Cfr. in questo volume il contributo a p. 54.

[13] Giulia Sammartano, *Suitability*... cit.

[14] Alessio Calantropio, Filiberto Chiabrando, Giulia Sammartano, Antonia Spanò, Lorenzo Teppati Losè, *UAV strategies validation and remote sensing data for damage assessment in post-disaster scenarios*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-3/W4, 2018, pp.121-128. Cfr. anche in questo volume il contributo a p. 68.

[15] Cfr. ancora in questo volume il contributo a p. 41.

[16] Gruppo SAPR dei Vigili del Fuoco: Andrea Di Lolli, Mattia Fiorini, Franco Feliziani, Marcello Firrincielli, Onofrio Lorusso.

[17] Giulia Sammartano, *Optimization of 3D multi-sensor models for damage assessment in emergency context: first tests on rapid mapping in the 2016 Italian earthquake*, in F. Remondino, A. Georgopoulos, D. Gonzalez-Aguilera, P. Agrafiotis (Eds.), *Latest Developments in Reality-Based 3D Surveying and Modelling*, MDPI 2017, pp. 141-168.

[18] Giulia Sammartano, *Suitability*... cit.

[19] Giulia Sammartano, *Optimization*... cit.

BY-NC-SA

Applicazioni di rapid mapping tramite sistema Freedom 360 a Norcia
Rapid mapping approaches using the Freedom 360 system at Norcia

LORENZO TEPPATI LOSÈ

Abstract
I sistemi definibili come camere sferiche o camere 360 sono stati soggetti a importanti sviluppi negli anni passati e le possibilità connesse al loro utilizzo in diversi settori sono state variamente esplorate. Una delle caratteristiche di tali sistemi risiede nella rapidità connessa al loro utilizzo e nella possibilità di acquisire l'ambiente che circonda la camera a 360 gradi. Date queste e altre specifiche, tali sistemi si prestano molto bene a diverse sperimentazioni volte a testarne le possibili applicazioni in contesti d'emergenza e con approcci di rapid mapping.

In the last years, the systems that can be defined as spherical or 360 cameras have undertaken major developments and the possibilities to use them in different applications have been variously exploited. One of the main characteristics of these systems is connected with their rapid deployment on the field and with the possibility to acquire the entire environment surrounding the camera at 360 degrees. All these specifications considered, it is clear that these systems can be successfully tested for different applications in emergency scenarios and adopting rapid mapping approaches.

Lorenzo Teppati Losè, dottore di ricerca in Beni architettonici e paesaggistici, assegnista in Geomatica presso il Politecnico di Torino, DAD
lorenzo.teppati@polito.it

1. Le camere 360. Tipologie e caratteristiche

I sistemi che permettono l'acquisizione di immagini sferiche, definiti come camere 360, sono stati protagonisti di un rapido sviluppo negli ultimi anni, in particolare in relazione al loro utilizzo nei settori connessi all'acquisizione di video e immagini a fini d'intrattenimento. Questi sistemi permettono di registrare in maniera omnidirezionale e omnicomprensiva l'intero ambiente che circonda la camera; un esempio d'immagine sferica in proiezione equirettangolare è riportato in Figura 1. I fondamenti di questa tecnologia risiedono negli algoritmi di *image-stitching* creati e sviluppati all'interno del settore della *computer vision* a partire dagli anni '90 del secolo scorso. Tali algoritmi, che adottano principi di correlazione d'immagini usati anche dalla fotogrammetria, permettono infatti di registrare e unire diverse immagini tra di loro, con l'obiettivo di ottenere una singola immagine omnicomprensiva dello spazio circostante i sensori utilizzati in fase di acquisizione. Inoltre, durante il corso degli anni tali sistemi hanno subito diverse trasformazioni, fino ad arrivare all'attuale configurazione.
Grazie al crescente interesse verso queste tecniche è oggi possibile reperire sul mercato diverse soluzioni a costi ridotti. Ad oggi è possibile definire due tipologie principali di camere 360: le soluzioni DIY (*Do It Yourself*) e le soluzioni COTS (*Commercial Off The Shelf*). All'interno della prima tipologia rientrano quei sistemi che è possibile assemblare utilizzando altre tipologie

Figura 1. Esempio d'immagine sferica in proiezione equirettangolare. Piazza del Duomo, Norcia (luglio 2018).

di camere grazie alla creazione di appositi supporti; molto spesso le camere utilizzate per tale scopo rientrano nella categoria delle *action cam*, grazie alle loro caratteristiche e al costo relativamente ridotto. Queste soluzioni sono state le prime a essere disponibili sul mercato e proprio per la loro intrinseca natura presentano diversi vantaggi, in particolare una più ampia possibilità di personalizzazione dei processi di *stitching* ed un maggior controllo da parte dell'utente nei software dedicati. D'altra parte, esse si configurano inoltre come sistemi meno stabili e meno affidabili rispetto a quelli commerciali. In maniera antitetica, i sistemi COTS garantiscono una maggiore affidabilità e in generale una maggior facilità di utilizzo da parte degli operatori, al prezzo però di rinunciare ad un maggior controllo da parte dell'utente sulle diverse fasi del processo di acquisizione ed elaborazione delle immagini. È inoltre interessante analizzare l'andamento del prezzo di tali sistemi durante gli ultimi anni: esso è infatti andato incontro ad una progressiva e costante riduzione dei costi, facilitando la diffusione di questa tipologia di camere in svariati settori.

2. Approcci della geomatica all'utilizzo di immagini 360

Grazie ai fattori precedentemente citati, alla maggiore diffusione di queste camere e al fatto che i principi legati alla generazione di questa tipologia d'immagini siano molto vicini agli approcci fotogrammetrici, le sperimentazioni legate all'utilizzo di tali sistemi con approcci di ricerca della geomatica hanno goduto di un discreto interesse in maniera piuttosto precoce[1]. Tra le varie applicazioni legate all'utilizzo di tali sistemi è interessante riportare come uno degli ambiti che fin da subito ha attratto gli sforzi dei ricercatori è quello legato alle applicazioni di *rapid mapping* e in particolare in connessione con la documentazione del patrimonio costruito[2]. Con il termine rapid mapping s'intende tradizionalmente la possibilità di fornire dati geo-spaziali di un determinato fenomeno, contesto od oggetto in tempi ridotti. L'applicazione di tali sistemi è stata quindi sperimentata in diversi ambiti e utilizzando diversi approcci. Una prima grande diversificazione dell'utilizzo di questi sistemi può essere infatti individuata nella scelta di utilizzarli da soli o in connessione con altri sensori (all'interno dei cosiddetti *Mobile Mapping Systems*). All'interno di questa esperienza si è deciso di testare la possibilità di utilizzo di tali camere da sole, con approcci *Structure from Motion* e di valutare a posteriori la loro interconnessione con altre tecniche e strumenti della geomatica.

3. Applicazioni in contesti d'emergenza: potenzialità e problematiche

A fronte di tali caratteristiche l'applicazione di queste tecniche risulta quindi particolarmente interessante in contesti d'emergenza, dove il fattore tempo ricopre da sempre un ruolo di primo piano. Al fattore tempo si sommano inoltre altre caratteristiche peculiari di questi sistemi: il costo ridotto, la facilità di utilizzo sul campo, le dimensioni ridotte e la versatilità dei dati acquisiti.

A seguito delle precedenti ricerche condotte con tali sistemi in altri contesti e all'interno dell'esperienza della task force del Politecnico di Torino successiva al sisma in Centro Italia del 2016 si è deciso di testare le possibilità connesse all'utilizzo di tali tecniche in contesti operativi e d'emergenza, come sarà riportato nel paragrafo successivo. A fronte di questa decisione un'analisi preliminare sulle potenzialità e le problematiche legate all'uso di tali sistemi è necessaria.

Il principale vantaggio risiede nella facilità e rapidità di utilizzo sul campo; diverse soluzioni sono infatti state sperimentate in connessione alla possibilità di adottare svariati supporti per la movimentazione della camera 360 (Figura 2) e in particolare sulla possibilità che tale camera venga utilizzata da operatori impegnati sul campo durante lo svolgimento di altre attività, come ad esempio il personale della Protezione Civile o dei Vigili del Fuoco. Un altro grande

Figura 2. Alcuni dei supporti che possono essere utilizzati per la movimentazione del sistema Freedom 360 durante le fasi d'acquisizione.

vantaggio connesso all'utilizzo di tali sistemi risiede inoltre nella versatilità dei dati acquisiti, che oltre all'utilizzo in ambiti connessi alla geomatica possono essere trattati per altre finalità a supporto delle operazioni sul campo. I dati raccolti possono infatti essere trasformati in video 360 e tour virtuali che possono essere facilmente condivisi tra i diversi enti impegnati sul campo, garantendo lo scambio d'informazioni preziose anche con le persone non presenti fisicamente sui luoghi dell'emergenza. Tali approcci presentano ovviamente anche delle criticità, soprattutto legate alla necessità di sviluppo di ricerche applicate e al fatto che diverse problematiche connesse al loro utilizzo siano ancora oggetto di sperimentazioni.

Il primo problema connesso all'adozione di tali approcci è legato alla loro georeferenziazione: a differenza dei *Mobile Mapping Systems*, che risolvono tale problematica grazie all'utilizzo e all'integrazione di diversi sensori per il posizionamento, un approccio fotogrammetrico con camere 360 utilizzate non in connessione ad altri sensori presenta maggiori problematiche. Una soluzione tradizionale, che prevede il posizionamento e la misura di punti di controllo, non è infatti compatibile con le necessità di rapidità e di sicurezza degli operatori in connessione alle operazioni in contesti d'emergenza. Uno degli aspetti ai quali si è lavorato è quindi connesso alla ricerca di soluzioni alternative per la georeferenziazione dei modelli ottenuti tramite i dati acquisiti con camere 360.

Un altro importante aspetto connesso ai modelli generati con tali sistemi è da relazionarsi con l'accuratezza e la risoluzione dei prodotti derivabili dai dati acquisiti con camere 360. Rispetto ad approcci fotogrammetrici più tradizionali infatti è possibile riscontrare alcune differenze. In primo luogo, i modelli derivati da camere 360 presentano generalmente una minor accuratezza rispetto a quelli generati con tecniche più tradizionali. In secondo luogo, anche la risoluzione di tali modelli è generalmente minore. Entrambe queste problematiche sono riconducibili alle caratteristiche intrinseche dei sensori che compongono le camere 360. Tali sensori sono infatti spesso derivati dal settore delle *action cam*, in particolare per le camere COTS, e presentano risoluzioni minori e distorsioni marcate che si ripercuotono su diversi aspetti del processo fotogrammetrico[3]. Tuttavia, in determinati contesti quali quelli dell'emergenza, queste criticità possono essere compensate dalla rapidità di acquisizione dei dati sul campo che, in una generale analisi costi-benefici nei contesti di rischio o post disastro, può risultare un fattore vincente rispetto alla perdita di accuratezza e risoluzione dei modelli generati.

4. I primi test a Norcia con il sistema Freedom 360

Diversi test sono stati programmati e completati durante le missioni condotte dal Gruppo di geomatica della task force del Politecnico di Torino nelle aree colpite dal sisma 2016, di particolare interesse risultano i test condotti presso Norcia (PG) il 02/12/2016. In tale contesto il sistema testato è stato il Freedom 360 (Figura 3): questa camera 360 è composta da un supporto stampato in 3D e progettato per alloggiare sei *action cam* (nel caso di questi test sono state utilizzate sei GoPro Hero 4 Silver edition). La qualità finale delle immagini sferiche generate da questo tipo di sistema, che integra camere diverse, è ovviamente influenzata dalle specifiche delle singole camere utilizzate.

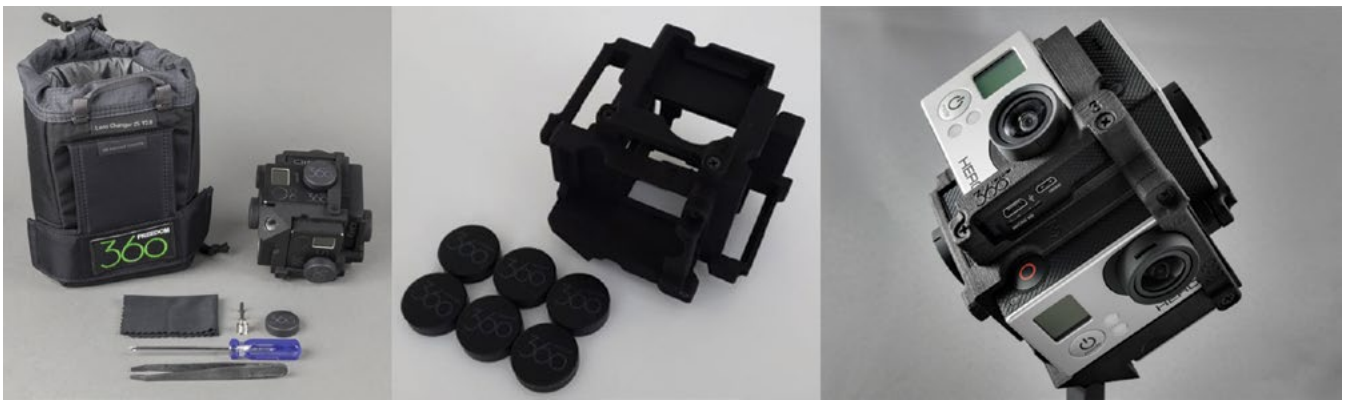


Figura 3. Il sistema Freedom 360.

Figura 4. Il percorso effettuato a Norcia utilizzando il sistema Freedom 360.

Nei test portati a termine a Norcia si è deciso di sfruttare al massimo le possibilità connesse alla rapidità di tali sistemi e per tale motivo si è deciso di acquisire sul campo video e non singole immagini panoramiche. Inoltre, il sistema Freedom 360 è stato montato su di un supporto estensibile fissato su di uno zaino rigido, in modo da lasciare l'operatore libero di muoversi e agire sul campo.
Una volta completato il set up del sistema e dopo aver avviato l'acquisizione dei video si è realizzato un percorso a piedi all'interno della zona rossa della città, grazie al supporto e alla presenza dei Vigili del Fuoco impegnati nelle operazioni nelle zone colpite dal sisma. Il percorso effettuato è stato di circa 1 km, ha richiesto 15 minuti ed è riportato in Figura 4. Successivamente sono stati estratti diversi frame dai video acquisti, utilizzando un intervallo di tempo regolare, in modo da poter procedere alle successive elaborazioni con un approccio fotogrammetrico. Come riportato nei paragrafi precedenti, tra i diversi problemi legati all'elaborazione di questo tipo di dati, risulta sicuramente di centrale importanza la questione della georeferenziazione del modello tridimensionale generato. Per sopperire all'assenza di punti di controllo misurati tramite approcci topografici tradizionali (scelta effettuata per snellire al massimo le operazioni da completarsi sul campo) si è deciso di adottare una strategia diversa. Grazie infatti alla disponibilità di un volo fotogrammetrico da UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) realizzato nei giorni precedenti alle acquisizioni con il sistema 360 è stato possibile estrarre le coordinate di diversi elementi naturali/antropici univocamente riconoscibili anche sulle immagini acquisite tramite sistema 360. Tali punti sono stati poi utilizzati all'interno del processo fotogrammetrico, per verificare l'accuratezza metrica del processo stesso e per completare la georeferenziazione del modello tridimensionale. Questo approccio, che sicuramente sacrifica parte delle accuratezze raggiungibili, permette comunque di raggiungere livelli di accuratezza sufficienti a supportare una scala di rappresentazione urbana (1:500-1:200). Inoltre, l'integrazione con dati da UAV contribuisce alla generale snellezza dell'intero processo. I dati così acquisiti hanno quindi permesso di completare diversi test seguendo questo approccio, alcune viste del modello 3D generato sono riportate in Figura 5.
A fronte dei test condotti permangono tuttavia alcune criticità che necessitano di essere approfondite tramite successivi test e sperimentazioni. Una delle criticità che è necessario considerare con maggiore attenzione al momento riguarda la quantità dei dati raccolti sul campo; il rischio connesso all'utilizzo di tali sistemi è infatti quello di raccogliere dati ridondanti che richiedono un maggior sforzo di selezione nelle successive fasi di elaborazione. In secondo luogo, le caratteristiche intrinseche delle camere che compongono il sistema devono essere attentamente considerate e modellate, per favorire un corretto completamento delle diverse fasi del processo fotogrammetrico. Infine, gli argomenti di ricerca connessi all'utilizzo di camere 360 sono ancora a uno stato preliminare e successivi sviluppi in questi settori saranno sicuramente forieri di miglioramenti.

Conclusioni

L'implementazione dell'utilizzo di immagini sferiche all'interno di approcci fotogrammetrici ha recentemente aperto nuove prospettive di ricerca e sviluppo nell'ambito di scenari operativi d'emergenza. Le camere COTS 360 si configurano infatti come strumenti versatili, di rapido impiego e che si prestano a promettenti sviluppi futuri. I temi che richiederanno maggiore attenzione per i futuri indirizzi di ricerca saranno probabilmente legati alla risoluzione del problema della georeferenziazione dei prodotti derivabili tramite questi approcci e al miglioramento degli approcci

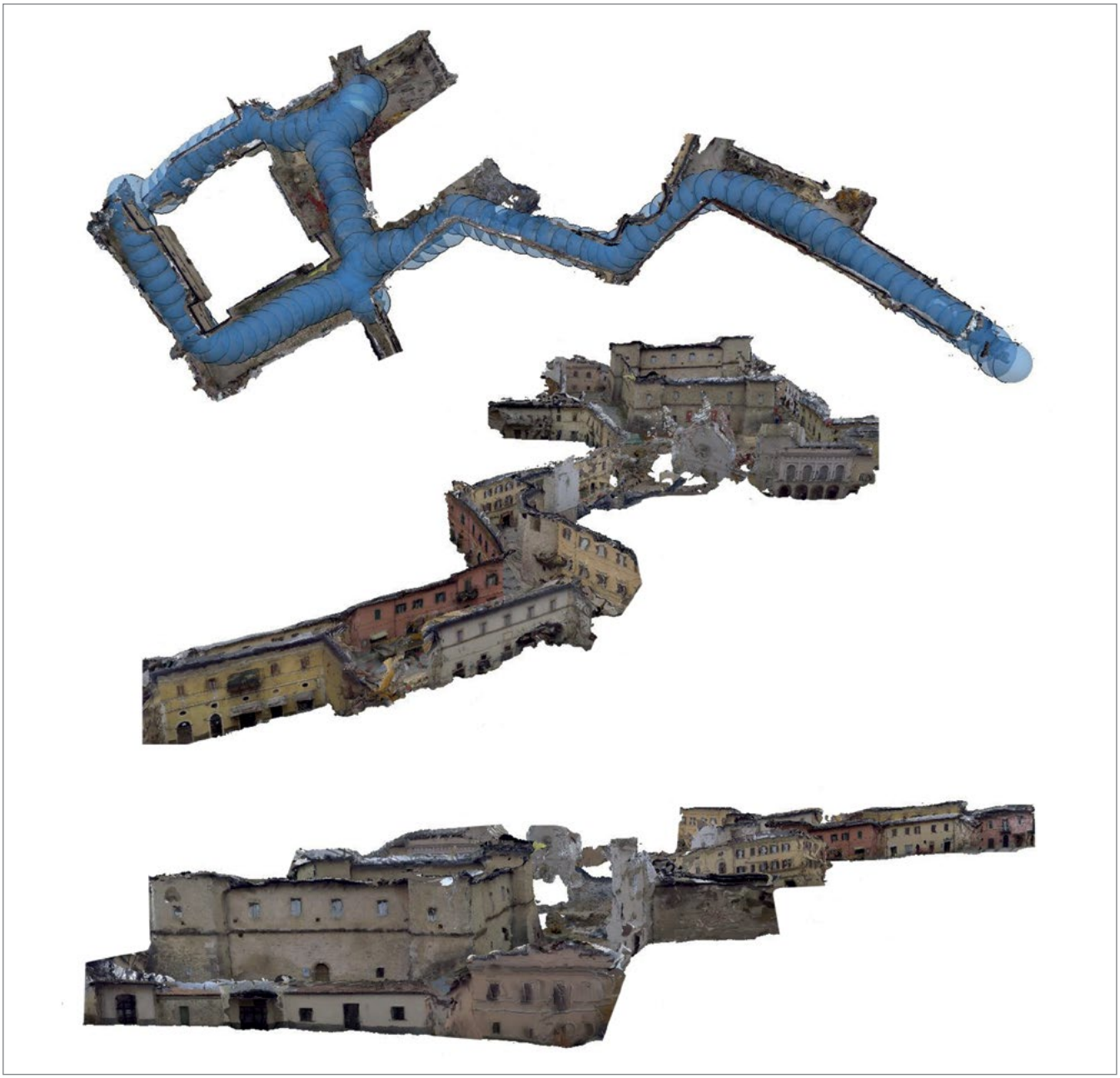


Figura 5. Alcune viste del modello 3D di una parte della città di Norcia generato tramite i dati generati con il sistema Freedom.

fotogrammetrici legati a tali sistemi. Un trend sicuramente interessante è legato allo sviluppo che questo tipo di sensori sta incontrando in tempi recenti; l'aumento di risoluzione di queste camere permetterà probabilmente di migliorare la risoluzione dei modelli 3D derivabili. Sarà infine necessario stabilire delle linee guida da concordare con gli operatori coinvolti nelle operazioni sul campo in modo da favorire e incentivare l'utilizzo di queste camere in tali scenari.

Note

[1] Gabriele Fangi, *The Multi-image spherical Panoramas as a tool for Architectural Survey*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XXXVI-5/C53, 2007, pp. 311-316. Gabriele Fangi, Carla Nardinocchi, *Photogrammetric processing of spherical panoramas*, in «Photogrammetric Record», 28 (143), 2013, pp. 293-311. Enzo D'Annibale, Livia Piermattei, Gabriele Fangi, *Spherical Photogrammetry as Emergency Photogrammetry*, in *Proceedings of XXIII CIPA (International Committee for Documentation of Cultural Heritage) Symposium*, Prague 2011.

[2] Wissam Wahbeh, Carla Nardinocchi, *Toward the Interactive 3D Modelling Applied to Ponte Rotto in Rome*, in «Nexus Network Journal», 17 (1), 2015, pp. 55-71. S. Kossieris, O. Kourounioti, Panagiotis Agrafiotis, Andreas Georgopoulos, *Developing a Low-Cost System for 3D Data Acquisition*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W8, 2017, pp. 119-126.

[3] Lorenzo Teppati Losè, Filiberto Chiabrando, Antonia Spanò, *Preliminary evaluation of a commercial 360 multi-camera RIG for photogrammetric purposes*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII, 2018, pp. 1113-1120.

BY-NC-SA

Fotogrammetria digitale speditiva a supporto degli interventi di realizzazione di opere provvisionali

Photogrammetric rapid survey for supporting the realization of provisional structures

ALESSIO CALANTROPIO, FILIBERTO CHIABRANDO, NANNINA SPANÒ

Alessio Calantropio, dottorando in Beni architettonici e paesaggistici, Politecnico di Torino
alessio.calantropio@polito.it

Filiberto Chiabrando, professore associato di Geomatica, Politecnico di Torino, DAD
filiberto.chiabrando@polito.it

Nannina Spanò, professore associato di Geomatica, Politecnico di Torino, DAD
antonia.spano@polito.it

Abstract

Uno degli sforzi più importanti, intrapresi dal Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco dopo il terremoto che ha colpito il Centro Italia nel 2016, è stato lo sviluppo di strategie per il consolidamento dei danni occorsi al patrimonio costruito. Lo studio qui riportato, tratto da una tesi di laurea, è stato condotto nel contesto di una collaborazione avviata tra la task force del Politecnico e il Nucleo Interventi Speciali (NIS) dei Vigili del Fuoco. In questa esperienza, come in molte altre presentate in questo volume, la fotogrammetria UAV si è dimostrata un metodo efficace ed efficiente per assistere la realizzazione di opere provvisionali, migliorando l'accuratezza del rilievo dei manufatti danneggiati e migliorando, al contempo, la sicurezza degli operatori coinvolti.

One of the most important effort undertaken, in the aftermath of the 2016 Italian earthquake, by the Italian National Firefighters Corps, has been the development of strategies for the consolidation of the damaged built heritage. The reported study, taken from a master degree thesis, has been conducted in the framework of a cooperation established between the Politecnico's task force and the Firefighters' NIS (Nucleo Interventi Speciali – Special Interventions Core). In this experience, like many others in this book, UAV photogrammetry has proved to be an effective and efficient solution for assisting the realization of urgent technical countermeasures for seismic emergency response, improving the accuracy of the surveyed damaged built heritage and enhancing, at the same time, the safety of the involved operators.

Introduzione

Facendo seguito alle esigenze di rapida documentazione e rilievo dei danni occorsi al patrimonio costruito in seguito al sisma del 2016, si è deciso di sperimentare, nel lavoro qui riportato, un approccio *image-based* mediante un'applicazione di tecniche fotogrammetriche, con lo scopo di fornire non soltanto un supporto al rilievo dello stato in cui versano i manufatti danneggiati, ma anche per supportare il miglioramento delle condizioni, in termini di sicurezza e fattibilità operativa, in cui avvengono le operazioni di *damage assessment and management*.

Nel dettaglio il presente studio[1] ha l'obiettivo di dare indicazioni in merito all'utilizzo di sistemi UAV (*Unmanned Aerial Vehichles*) a supporto della progettazione di opere provvisionali in interventi tecnici a seguito di emergenza sismica. Lo scopo della ricerca è quello di analizzare precisioni e accuratezze ottenibili generando modelli fotogrammetrici da riprese aeree e terrestri, effettuando un'assegnazione della scala del modello basata su distanze acquisibili anche in

Figura 1. Il duomo Vecchio di San Severino Marche (ripresa da drone).

modalità diretta, misurate ai piedi del manufatto rilevato. Il motivo alla base di questa scelta metodologica è legato alla volontà di fornire, nell'ambito di una collaborazione attivata con il CNVVF (Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco), un metodo operativo, applicabile senza oneri economici nell'acquisto di ulteriore strumentazione di rilievo.
Il manufatto architettonico, costituente il caso di studio di questa ricerca, si colloca in un contesto di medio rischio, e riguarda la bifora ovest del campanile appartenente al complesso (XIII-XV sec.) del Duomo Vecchio di San Severino Marche (Figura 1), in provincia di Macerata (MC).

1. Le opere provvisionali e il supporto offerto dalle tecniche e dai metodi della Geomatica

È compito dei Vigili del Fuoco, in coordinamento con il Dipartimento della Protezione Civile, eseguire le verifiche del danno e dell'agibilità delle strutture colpite dal sisma, oltre alla messa in sicurezza del patrimonio storico e artistico danneggiato mediante la realizzazione di opportune opere provvisionali[2]. Anche se queste opere sono intrinsecamente concepite per resistere alle sollecitazioni delle scosse successive, la sicurezza degli operatori durante la loro realizzazione rappresenta un fattore cruciale.
Una strategia fondamentale per la diminuzione dei rischi operativi è la riduzione del tempo di permanenza degli operatori nelle aree pericolose; è in queste situazioni che si configura lo scenario di utilizzo di sistemi di rilievo metrico avanzato e delle tecniche di fotogrammetria da drone; tali metodologie permettono di ridurre i tempi di esposizione degli operatori ai rischi di permanenza in zone pericolose durante le operazioni di rilievo e, al contempo, fornire una precisione maggiore rispetto alle operazioni di rilievo metrico tradizionale attualmente adoperate.
L'applicazione di questi metodi andrebbe a ridurre al minimo l'intervento umano per il rilievo delle caratteristiche geometriche del manufatto, soprattutto negli scenari che richiedono lavori in quota o in contesti di sicurezza precaria (come, ad esempio, gli interventi su torri o campanili). L'adozione di tecniche di rilievo a distanza in questi contesti garantisce la massima condizione di sicurezza per gli operatori, e questo studio si pone come occasione di valutare la possibilità di implementare nuove procedure operative per la gestione di eventi futuri.

2. Acquisizione ed elaborazione dei dati

La campagna di acquisizione dati è stata condotta dal team DIRECT (DIsaster RECovery Team) del Politecnico di Torino nell'ambito del progetto che ha coinvolto l'Ateneo torinese (con la task force coordinata dal prof. Sebastiano Foti) per interventi speditivi d'emergenza finalizzati alla documentazione delle aree del Centro Italia.
Le riprese fotogrammetriche aeree sono state effettuate utilizzando un drone DJI Phantom 4 PRO, equipaggiato con sensore DJI Zenmuse X4S da 20 Megapixel. I dati raccolti sono stati integrati con alcune immagini riprese da terra con camera Nikon D800E dotata di obiettivo da 24 mm.
Seguendo il tradizionale workflow fotogrammetrico, si è proceduto inizialmente all'orientamento dei fotogrammi e alla generazione della nuvola sparsa di punti, e

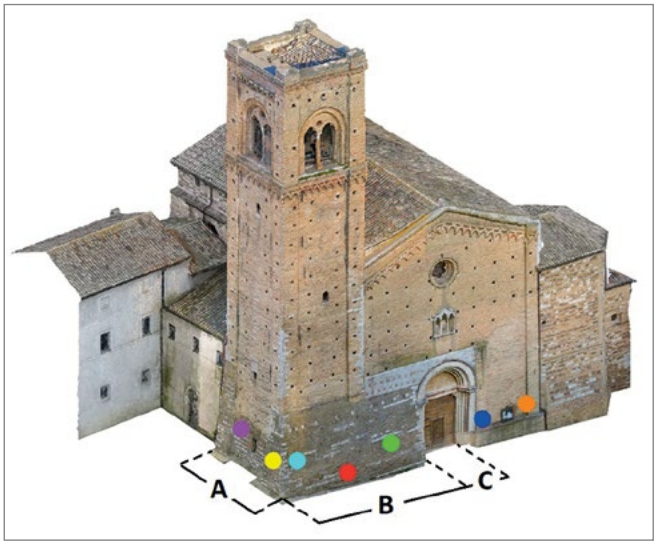


Figura 2. Modello fotogrammetrico 3D, sul quale sono evidenziate la distribuzione spaziale delle distanze utilizzate per scalare il modello fotogrammetrico (a, b e c) e dei punti di verifica utilizzati per l'analisi dei residui dopo l'allineamento della nuvola fotogrammetrica con la nuvola TLS.

ID	Grandezze misurate con bindella [m]	Grandezze misurate sul modello [m]	Residui [mm]
a	7,730	7,718	-12
b	10,760	10,772	12
c	2,430	2,412	-18
Residuo medio assoluto			14

Tabella 1. Grandezze determinate mediante bindella, misurate sul modello scalato e residui derivanti dalla differenza delle misure. La posizione delle tre distanze è illustrata in Figura 2.

successivamente alla generazione del modello 3D (nuvola densa di punti e relativo modello triangolato).
Nell'ottica di simulare una situazione emergenziale e di valutare un metodo di acquisizione rapido, economico, di facile applicazione, che riducesse al minimo la permanenza degli operatori sul campo, senza ricorrere quindi alle misure topografiche e senza compromettere per questo la qualità dei dati acquisiti, l'assegnazione della scala del modello fotogrammetrico è avvenuta applicando il metodo dei minimi quadrati su tre distanze determinate contestualmente al rilievo fotogrammetrico[3], misurate mediante bindella metrica alla base del campanile e della facciata del Duomo (Figura 2 e Tabella 1).

3. Analisi e discussione dei risultati

Con l'obiettivo di validare la qualità del modello 3D fotogrammetrico, si è deciso di confrontarlo con il modello ottenuto mediante tecnica TLS (*Terrestrial Laser Scanning*); la nuvola di punti prodotta mediante fotogrammetria è stata quindi allineata alla nuvola di punti TLS (utilizzata come *ground-truth*) effettuando una rototraslazione rigida; le due nuvole sono state allineate mediante algoritmo ICP (*Iterative Closest Points*)[4], applicato sulla totalità dei punti delle due nuvole. Successivamente è stata eseguita una verifica dell'accuratezza dell'allineamento automatico, osservando gli errori residui su 7 target della misura di 10x10 cm, precedentemente misurati per via topografica (Tabella 2). Con l'obiettivo di ricavare misure che potessero essere funzionali all'elaborazione di uno schema di progetto volto alla realizzazione di un'opera provvisionale sulla bifora ovest (Figura 3) del campanile (sbadacchiatura o controventatura), i modelli TLS e fotogrammetrico, sovrapposti, sono stati ritagliati includendo solamente la porzione oggetto dell'analisi.
A seguito di un ulteriore allineamento mediante algoritmo ICP, limitato alla porzione della bifora, è risultato un errore medio di 14 mm e una deviazione standard di 19 mm. Si è proceduto quindi al confronto C2C (*Cloud To Cloud*) dei due modelli (Figura 4).
Si può osservare come gli scostamenti tra i due modelli siano per il 60,8% inferiori a ±1 cm; in questo caso il metodo descritto può essere considerato un supporto di elevato profilo al dimensionamento delle opere provvisionali. Questo risultato è molto apprezzabile se consideriamo che la parte di modello analizzata è posizionata sul campanile, a un'altezza di 20 m da terra, cioè in una posizione piuttosto distante dai riferimenti utilizzati per l'assegnazione della scala.

Verifica sui punti	Residuo medio dei target [mm]					13		
	Deviazione standard (σ) [mm]					6		
	N° target					7		
	ID target	•	•	•	•	•	•	•
	Residui [mm]	19	16	4	4	15	14	19

Tabella 2. Residuo medio e deviazione standard sui target a seguito della verifica dell'allineamento della nuvola fotogrammetrica sulla nuvola TLS.

Figura 3. L'apertura bifora oggetto del rilievo. Immagine acquisita da drone.

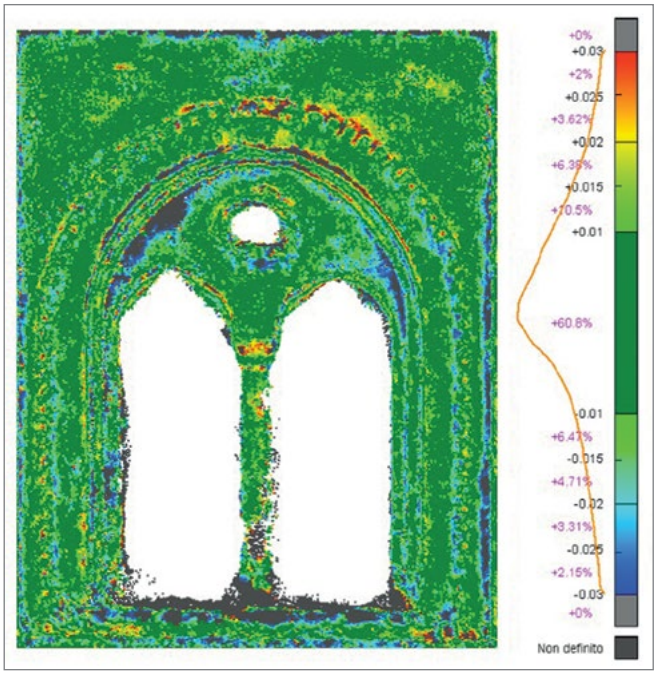


Figura 4. Confronto C2C tra le nuvole di punti generate mediante tecnica TLS e tecnica fotogrammetrica della bifora ovest del campanile del Duomo Vecchio.

Figura 5. Sequenza figurata che illustra il workflow studiato per la realizzazione di opere provvisionali con garanzia di maggior sicurezza per gli operatori VVF.

Conclusioni

L'utilizzo di tecniche di fotogrammetria digitale applicate a immagini aeree o terrestri, dato il carattere estremamente speditivo delle operazioni di rilievo e la sufficiente accuratezza ottenibile in aree o porzioni di beni architettonici poco raggiungibili, senza la necessità di misurare punti di appoggio per via topografica e nell'impossibilità operativa di effettuare misure dirette in quota, può essere utilizzata per il supporto delle attività di messa in sicurezza degli edifici da parte del CNVVF. L'implementazione programmatica della procedura descritta nelle prassi operative da applicare in scenari emergenziali (Figura 5) costituirebbe un importante miglioramento della sicurezza degli operatori, e un passo avanti verso l'uniformazione di procedure che, a causa dell'elevata eterogeneità del patrimonio architettonico storico che insiste sul nostro territorio, risultano ancora poco standardizzate.

Ringraziamenti

Questo lavoro di ricerca ha potuto beneficiare della collaborazione del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco; si ringraziano specialmente gli ingegneri Ciro Bolognese, Marco Cavriani, Emanuele Gissi e Luca Ponticelli. Un sentito ringraziamento va al Comune di San Severino Marche per la disponibilità accordataci.

Note

[1] Alessio Calantropio, *L'utilizzo dei droni per la sicurezza nei cantieri e negli interventi tecnici in emergenza sismica*, tesi di laurea magistrale in Architettura costruzione città, Politecnico di Torino, relatori Antonia Spanò, Filiberto Chiabrando, luglio 2017.

[2] Gruppo di Lavoro NCP, *Manuale. Opere Provvisionali. L'intervento tecnico urgente in emergenza sismica*, Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco – Ministero dell'Interno, Roma 2010.

[3] Thomas Luhmann, *Close range photogrammetry for industrial applications*, in «ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing», 65 (6), 2010, pp. 558-569.

[4] Paul J. Besl, Neil D. McKay, *Method for registration of 3-D shapes*, in «Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures», vol. 1611, 1992, pp. 586-607.

BY-NC-SA

Integrazione e validazione di immagini oblique e ad asse orizzontale da UAV per la Torre degli Smeducci a San Severino Marche

UAV oblique and horizontal image integration for the Smeducci Tower in San Severino Marche

STEFANO PERSICO, FILIBERTO CHIABRANDO, ANDREA LINGUA, GIULIA SAMMARTANO

Abstract

Durante i lavori di documentazione di alcuni beni architettonici condotti dal team DIRECT nelle aree del Centro Italia colpite dal sisma del 2016, nell'intervallo temporale tra il 20 ed il 24 febbraio 2017 sono stati presi in considerazioni due principali monumenti di interesse storico presenti nell'area di San Severino Marche: il campanile del Duomo Vecchio e la Torre Comunale o degli Smeducci, situati sulla sommità del Monte Nero.

La torre degli Smeducci è stata analizzata più nel dettaglio in quanto la sua struttura presentava a seguito dell'evento sismico diffusi dissesti strutturali visibili sia nella parte esterna che in quella interna, destando elevate preoccupazioni in quanto è una torre isolata e presenta una inclinazione ingente dovuta a problemi nelle fondazioni.

Alla luce delle caratteristiche della Torre, la strategia più opportuna per la documentazione e modellazione 3D della sua consistenza è risultato essere l'impiego di sistemi UAV in grado di acquisire immagini con l'asse di presa posizionato in diverse configurazioni: nadirale (verticale, con direzione ricolta verso il terreno), obliquo e perpendicolare ai fronti della Torre stessa.

During the documentation work of some architectural heritage conducted by the DIRECT team in the areas of central Italy affected by the 2016 earthquake, in the time interval between 20th and 24th February 2017, two main monuments of historical interest were taken into consideration in the San Severino Marche area: the bell tower of the Old Cathedral and the Municipal Tower, named of the Smeducci, located on the top of Monte Nero.

The Smeducci tower has been analyzed in more detail as its structure showed widespread structural instability as a result of the seismic event, both on the outside and on the inside, giving rise to high concerns as it is an isolated tower and has a significant inclination due to problems in foundations.

In light of the characteristics of the Tower, the most appropriate strategy for the documentation and 3D modeling of its consistency was the use of UAV systems capable of acquiring images with the optical axis positioned in different configurations: nadiral (vertical, with direction towards the ground), oblique and perpendicular to the fronts of the tower itself.

Stefano Persico, laureato magistrale in Ingegneria edile, Politecnico di Torino, DIATI
stefano.persico@studenti.polito.it

Filiberto Chiabrando, professore associato di Geomatica, Politecnico di Torino, DAD
filiberto.chiabrando@polito.it

Andrea Lingua, professore ordinario di Geomatica, Politecnico di Torino, DIATI
andrea.lingua@polito.it

Giulia Sammartano, dottore di ricerca in Beni architettonici e paesaggistici, assegnista in Geomatica presso il Politecnico di Torino, DAD
giulia.sammartano@polito.it

Introduzione

È ormai ampiamente consolidato nel campo della documentazione del patrimonio costruito l'utilizzo delle tecniche e dei metodi della Geomatica, che consentono in tempi relativamente brevi e con costi sostenibili la realizzazione di modelli 3D e tradizionali rappresentazioni architettoniche. Tali

rappresentazioni oggi sempre più consentono un'accurata analisi dello stato di conservazione del manufatto d'interesse, non solo dal punto di vista dello stato di conservazione ma anche per quel che riguarda la componente strutturale, fattore di grande importanza quando si devono valutare i danni a seguito di un sisma. Alla luce delle caratteristiche della struttura oggetto dell'analisi si è optato per un approccio *image-based* mediante l'utilizzo di tecniche fotogrammetriche. Uno degli obiettivi principali è stato quello di fornire agli attori coinvolti nel processo di conservazione della Torre gli elaborati utili alla documentazione del bene architettonico, ma anche di sperimentare e validare un metodo di acquisizione ed elaborazione dei dati che consentisse di ottenere in tempi brevi prodotti con elevato contenuto informativo e precisioni congruenti con una rappresentazione a scala architettonica (1:100-1:50; accuratezze attese comprese tra 1 e 2 cm).
In particolare, nello studio riportato di seguito verranno analizzate e valutate le caratteristiche legate al rilievo eseguito con tecnica fotogrammWetrica grazie all'utilizzo di un sistema UAV multi rotore in grado di acquisire immagini a distanze molto prossime all'oggetto ripreso. Saranno infine riportate le analisi eseguite utili alla validazione dei prodotti realizzati oltre agli elaborati grafici che riguardano i quattro fronti della Torre.

1. Acquisizione ed elaborazione dei dati

Lo studio della Torre degli Smeducci[1], oggetto della campagna di acquisizione dati da parte del team DIRECT (DIsaster RECovery Team) è stato oggetto di una tesi di laurea, ed è stato riferito come report scientifico in quanto nel periodo immediatamente successivo al sisma si sono susseguite conferenze e workshop finalizzati alla presentazione di strategie e applicazioni per migliorare le azioni preventive o di Disaster Management da parte di molti settori di analisi diversi[2].
Come di consueto, per la realizzazione di un rilievo metrico tridimensionale è necessario integrare diverse tecniche e metodi utili a una corretta documentazione dell'oggetto che si intende studiare. Di conseguenza per la Torre sono stati come prima cosa materializzati e misurati i vertici della rete di inquadramento realizzata con l'utilizzo di strumentazione GNSS; successivamente oltre al posizionamento e alla misura dei marker sul terreno e sui fronti del manufatto architettonico è stato eseguito il rilievo di dettaglio con tecniche *range-based* e *image-based*. Le prime hanno riguardato la misura con Laser Scanner terrestre (TLS - *Terrestrial Laser Scanning*) dell'intera area della Torre. Alla luce della geometria dell'oggetto, che si sviluppa perlopiù in altezza, sarebbe stato necessario l'impiego di una piattaforma elevatrice per completare e documentare in modo uniforme l'area oggetto della sperimentazione mediante TLS. Non potendo prevedere tale supporto e non trattandosi di una soluzione sostenibile in termini di costi e tempi nei contesti di emergenza, si è deciso di utilizzare come dati utili alla documentazione della Torre e delle successive rappresentazioni, esclusivamente quelli provenienti dal processo fotogrammetrico che ha previsto l'utilizzo di immagini acquisite dal sistema UAV, riservandosi l'utilizzo delle misure laser come dato di confronto per la valutazione della precisione e validazione dei risultati ottenuti.
Per le acquisizioni da UAV è stato utilizzato un drone DJI Phantom 4 PRO, equipaggiato con sensore DJI Zenmuse X4S da 20 Megapixel. Per il rilievo dell'intera area della torre, le acquisizioni inclinate (45°) e nadirali sono state programmate e realizzate in automatico grazie agli appositi applicativi che hanno consentito di acquisire dati sulla torre da una quota pari a 50 m (dimensione del pixel a terra, *Ground Sampling Distance* GSD=1,93 cm) con sovrapposizioni longitudinali pari al 80% e trasversali del 70%.
Il rilievo dei fronti invece doveva consentire un livello di dettaglio maggiore utile per una rappresentazione a scala 1:50[3].
Per l'esecuzione dei voli in questo caso è stato necessario avvicinarsi notevolmente all'oggetto da riprendere (acquisizione eseguita a circa 20 m con GSD pari a 0,7cm). Tali voli sono stati eseguiti in modalità manuale dall'operatore controllando il più possibile la sovrapposizione tra le immagini e le strisciate adiacenti (Figura 1).
L'elaborazione dei dati è stata realizzata utilizzando il tradizionale workflow fotogrammetrico che ha previsto in sequenza: l'orientamento dei fotogrammi con la generazione della nuvola sparsa di punti, la collimazione dei Ground Control Points (GCPs) e Control Points (CPs) utili per la relativa triangolazione aerea che ha consentito di valutare la precisione del blocco fotogrammetrico ottenuto (Tabella 1).

	σXYZ [m]	RMSEXY [m]	RMSEXYZ [m]
GCPs (15)	0,005	0,009	0,017
CPs (6)	0,012	0,013	0,023

Tabella 1. Risultati relativi al processo di triangolazione aerea.

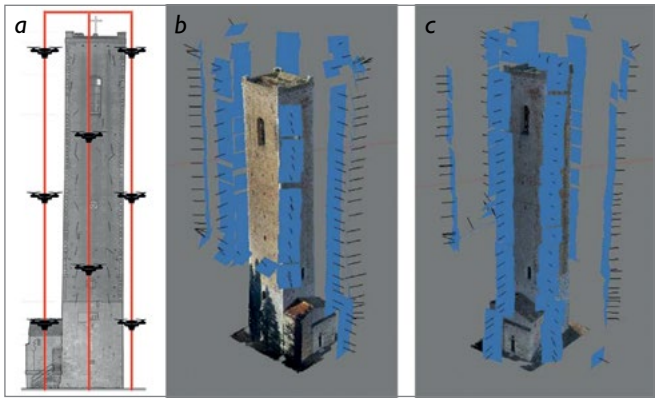


Figura 1. Rilievo fotogrammetrico dei fronti della torre: (a) schema del piano di volo eseguito; (b) visualizzazione delle immagini orientate nel software utilizzato, vista fronte sud-est; (c) vista del fronte nord-est.

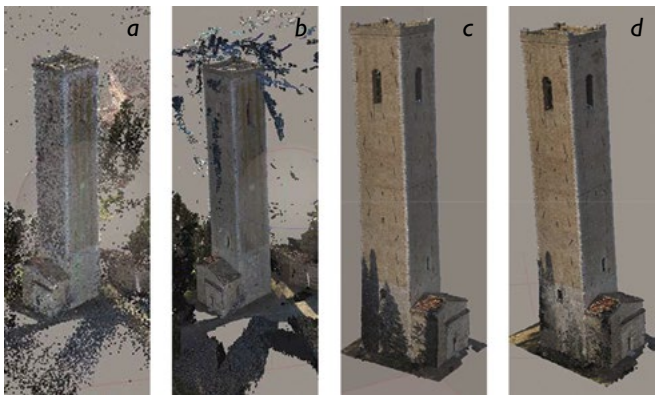


Figura 2. Modello fotogrammetrico 3D: (a) nuvola sparsa; (b) nuvola densa; (d) nuvola densa dopo il processo di pulizia e riduzione rumore; (d) modello 3D texturizzato.

Successivamente è stato generato il modello 3D inizialmente attraverso la realizzazione della nuvola densa di punti e in seguito con la creazione della mesh e relativa texture fotografica (Figura 2). Infine per ciascun fronte sono state estratte le ortofoto per una corretta rappresentazione della Torre Smeducci (Figura 3).

2. Considerazioni generali e discussione sui risultati

Al termine delle operazioni di acquisizione e alla luce dei risultati ottenuti è necessario riportare alcune considerazioni sia di carattere generale che legate alle specificità dell'oggetto studiato.

Ancora una volta è confermata la grande flessibilità dei sistemi UAV per il rilievo del patrimonio costruito, che in questo caso hanno consentito un'integrazione della geometria di acquisizione che ha previsto non solo i consolidati voli nadirali e obliqui ma anche l'utilizzo di immagini riprese con asse perpendicolare ai fronti dell'oggetto del rilievo. Tale modalità è stata appositamente sperimentata per consentire la predisposizione degli elaborati finali che presentassero una congruenza geometrica e radiometrica sia nella parte bassa della Torre che in quella sommitale. Tale aspetto infatti non sarebbe stato garantito con le sole acquisizioni fotogrammetriche terrestri (*close-range*) integrate dai tradizionali voli obliqui (solitamente con asse di presa a 45°)[4].

L'analisi dei risultati dal punto di vista metrico è stata condotta grazie all'utilizzo di dati di diversa natura quali acquisizioni eseguite con laser scanner terrestre o fotogrammetria *close-range*. A titolo esemplificato sono riportate le analisi eseguite sulle densità della nuvola di punti generata con l'utilizzo del sistema UAV rispetto a quella rilevata con il TLS che in questo caso rappresenta un termine di confronto, anche detto *ground-truth*, e quelle relative alla precisione valutando le differenze medie tra nuvola laser e UAV.

Per valutare la densità è stata presa in considerazione la concentrazione più o meno elevata di punti (*number of neighbors*) in un intorno di raggio pari alla precisione (20 mm) della scala di rappresentazione considerata (1:100) Le differenze medie sono state invece valutate grazie ad un confronto *cloud to cloud* (sono state calcolate media e deviazione standard). Entrambe le analisi sono state eseguite grazie all'ausilio del software *Cloud Compare*: i risultati sono riportati nelle Tabelle 2 e 3.

Come si evince dai valori riportati nelle tabelle i risultati ottenuti consentono di validare la metodologia seguita per la realizzazione di elaborati grafici e modelli 3D congruenti con la scala di rappresentazione ipotizzata in fase di progetto.

Note

[1] Cfr. in questo volume il contributo a p. 91.

[2] Stefano Persico, *Rapid mapping multipiattaforma per rilievi 3D post emergenza. Le analisi della Torre degli Smeducci a San Severino Marche*, tesi di laurea magistrale in Ingegneria edile, Politecnico di Torino, relatori Andrea Lingua, Filiberto Chiabrando, ottobre 2017. Filiberto Chiabrando, Andrea Lingua, Antonia Spanò, Stefano Persico, Raffaella Stano, *Immagini oblique acquisite da UAV per il rilevamento architettonico post-emergenza*, in *Atti della conferenza nazionale Asita*, 2017, pp. 239-246.

[3] Cristiana Achille, Andrea Adami, Silvia Chiarini, Stefano Cremonesi, Francesco Fassi, Luigi Fregonese, Laura Taffurelli, *UAV-based photogrammetry and integrated technologies for architectural applications. Methodological strategies for the after-quake survey of vertical structures in Mantua (Italy)*, in «Sensors», 15 (7), 2015, pp. 15520-15539.

[4] Irene Aicardi, Filiberto Chiabrando, Nives Grasso, Andrea Lingua, Francesca Noardo, Antonia Spanò, *UAV photogrammetry with oblique images: first analysis on data acquisition and processing*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLI-B1, 2016, pp. 835-841.

Densità media del modello della torre (R=20 mm)			
Nord [mm]	Sud [mm]	Est [mm]	Ovest [mm]
24	34	29	33

Tabella 2. Densità media del modello di punti della Torre degli Smeducci, in ciascuno dei fronti che la compongono.

Nord		Sud		Est		Ovest	
M [mm]	σ [mm]	M [mm]	σ [mm]	M [mm]	σ [mm]	M [mm]	σ [mm]
9,4	8,8	17,1	23,0	11,4	15,2	10,1	7,5

Tabella 3. Media e deviazione standard delle comparazioni tra coppie di nuvole (TLS e fotogrammetriche) su ciascun fronte.

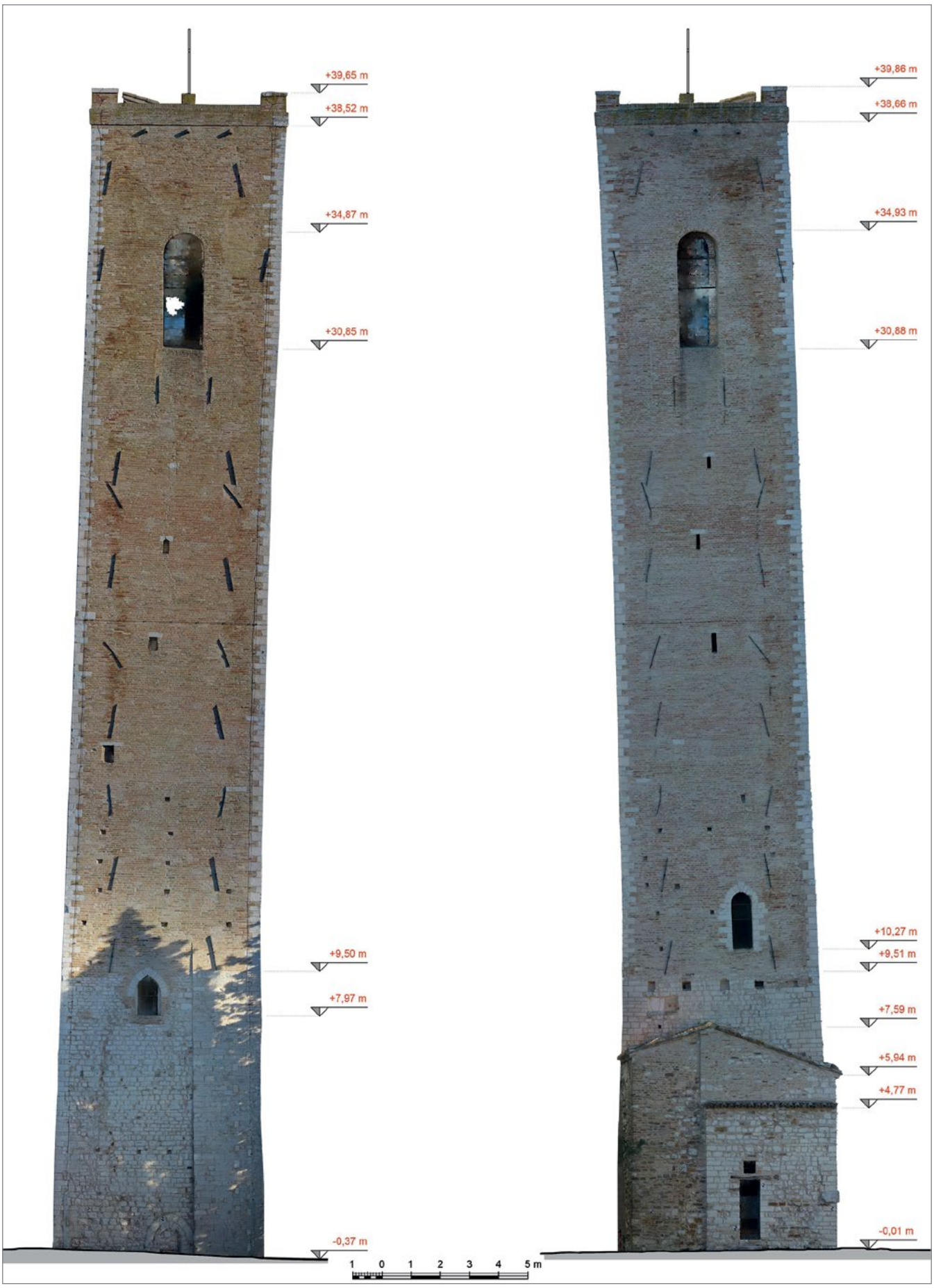


Figura 3. Prospetti ovest ed est della Torre degli Smeducci (scala originale 1:100).

BY-NC-SA

Nuvole di punti, rappresentazione architettonica e analisi dei modelli 3D ottimizzati per lo studio della basilica di San Nicola a Tolentino

Point clouds, architectural representation and analysis of 3D optimized models for the study of the San Nicola cathedral in Tolentino

DAVIDE EINAUDI, ALESSANDRA SPREAFICO, NANNINA SPANÒ

Davide Einaudi, laureato magistrale in Architettura per il progetto sostenibile, Politecnico di Torino, DAD
davide.einaudi@polito.it

Alessandra Spreafico, dottoranda in Beni architetonici e paesaggistici, Politecnico di Torino
alessandra.spreafico@polito.it

Nannina Spanò, professore associato di Geomatica, Politecnico di Torino, DAD
antonia.spano@polito.it

Abstract
La realizzazione dei disegni architettonici e le analisi tecniche basate su modelli digitali ottenuti da rilievi metrici 3D sono attualmente un tema di sicuro interesse, ma soprattutto di grande importanza per la documentazione del patrimonio culturale colpito da eventi sismici. Questo contributo ha lo scopo di presentare alcune possibilità percorribili per la fruizione dei prodotti realizzati a partire dai rilievi 3D, nonché le problematiche di interpretazione della forma e delle relative anomalie che i contesti architettonici possono presentare. A partire dunque dalla generazione di nuvole 3D ottenute dall'integrazione di rilievi laser scanning, fotogrammetria terrestre e UAV e attraverso lo studio di alcuni nodi problematici dal punto di vista della vulnerabilità sismica nella basilica di San Nicola di Tolentino (MC), tale contributo illustra differenti soluzioni utili per l'analisi e l'interpretazione di diverse porzioni di fabbrica e di vari elementi architettonici e costruttivi particolarmente soggetti alle azioni dei terremoti nelle chiese.

The process of achieving architectural drawing and technical analysis of 3D models derived from three-dimensional survey is nowadays an important theme for the documentation of the cultural heritage affected by earthquake.
This manuscript aims to present some accessible possibilities for the use of products from 3D imaging and ranging survey, and the problems of interpretation of the shape and related anomalies that architectural contexts can present. Therefore, starting from the generation of 3D clouds obtained by the integration of laser scanning surveys, terrestrial and UAV photogrammetry and through the study of some problematic nodes from the point of view of seismic vulnerability in the San Nicola cathedral in Tolentino (MC), this paper illustrates different solutions useful for the analysis and interpretation of different parts of the factory, and of various architectural and construction elements particularly subject to the actions of earthquakes in the churches.

Introduzione
Eventi catastrofici come quelli sismici costituiscono un'eccezionalità che ha sconvolto il Centro Italia negli ultimi anni e di cui sono ancora ben visibili gli effetti. Da ciò nasce l'esigenza della documentazione, dalla scala territoriale fino a quella architettonica; in tale scenario il patrimonio culturale si presenta come un elemento fragile da conoscere e monitorare. Negli ultimi anni si è assistito a una progressiva diffusione di modelli 3D realizzati a partire da strumenti differenti, in particolar modo grazie all'integrazione di dati ottenuti

da *Terrestrial Laser Scanning* (TLS) e dalla fotogrammetria UAV (*Unmanned Aerial Veicles*) che rendono possibile il rilievo in aree soggette a rischio sismico in maniera speditiva, in condizioni di sicurezza e acquisendo dati completi[1]. Dopo l'elaborazione i dati raccolti possono essere impiegati per diversi usi consentendo analisi che contribuiscono in modo significativo alla conoscenza della struttura architettonica e al monitoraggio della condizione in cui versa nel tempo[2]. Le elevate accuratezze metriche raggiungibili grazie al controllo consentito dalle misure topografiche rendono possibile documentare in modo accurato gli oggetti di studio; tuttavia, il processo di ottimizzazione dei modelli 3D e la derivazione dei disegni architettonici richiede alcune accortezze per una corretta restituzione degli elaborati.

1. Il rilievo metrico 3D della basilica di San Nicola e gli elaborati architettonici

Gli sciami sismici susseguitisi da agosto a ottobre 2016 e seguenti, hanno evidenziato la fragilità e vulnerabilità della basilica e del convento di San Nicola di Tolentino, un bene architettonico d'interesse storico e artistico[3]. Il team DIRECT (*DIsaster RECovery Team*), nell'ambito della task force del Politecnico di Torino, come già presentato in precedenza, ha realizzato un rilievo metrico post-sisma utilizzando differenti tecnologie che hanno permesso la realizzazione di un modello 3D del complesso religioso, anche finalizzato ad approfondire il comportamento dell'edificio rispetto all'azione sismica e a progettare il monitoraggio dinamico[4].

In questo contributo si farà riferimento a un metodo consolidato e adottato nei percorsi didattici dell'area dell'architettura per derivare i disegni architettonici dell'interno della chiesa dalle nuvole 3D[5], e saranno presentate alcune analisi 3D su modelli di punti e modelli triangolati della zona absidale, proprio perché le analisi del comportamento strutturale sopraindicate hanno individuato in tali porzioni del complesso i problemi di dissesto più rilevanti. Il rilievo 3D dell'intero complesso architettonico (Figura 1), ha raccolto dati ottenuti tramite laser scanner (*Faro Focus 3D*) e fotogrammetria aerea (*Dji Phantom 4 Pro e Mavic Pro*), che sono stati integrati tra loro attraverso l'impiego di un unico sistema di riferimento fornito dalla rete di inquadramento realizzata tramite

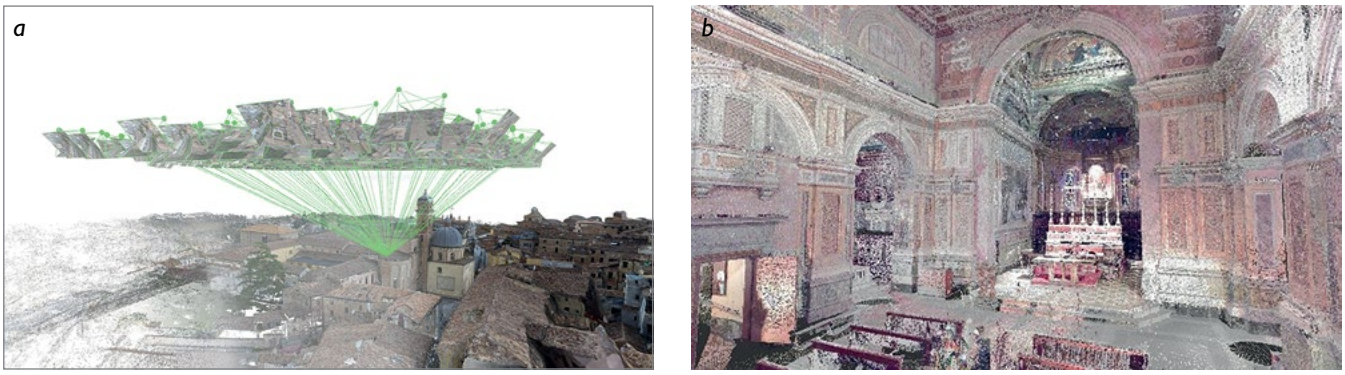


Figura 1. Rilievo 3D da tecniche fotogrammetriche e Lidar della Basilica di San Nicola: (a) aerofotogrammetria da UAV (da sinistra: spare cloud, dense cloud, mesh); (b) nuvola di punti interna alla basilica ottenuta da TLS.

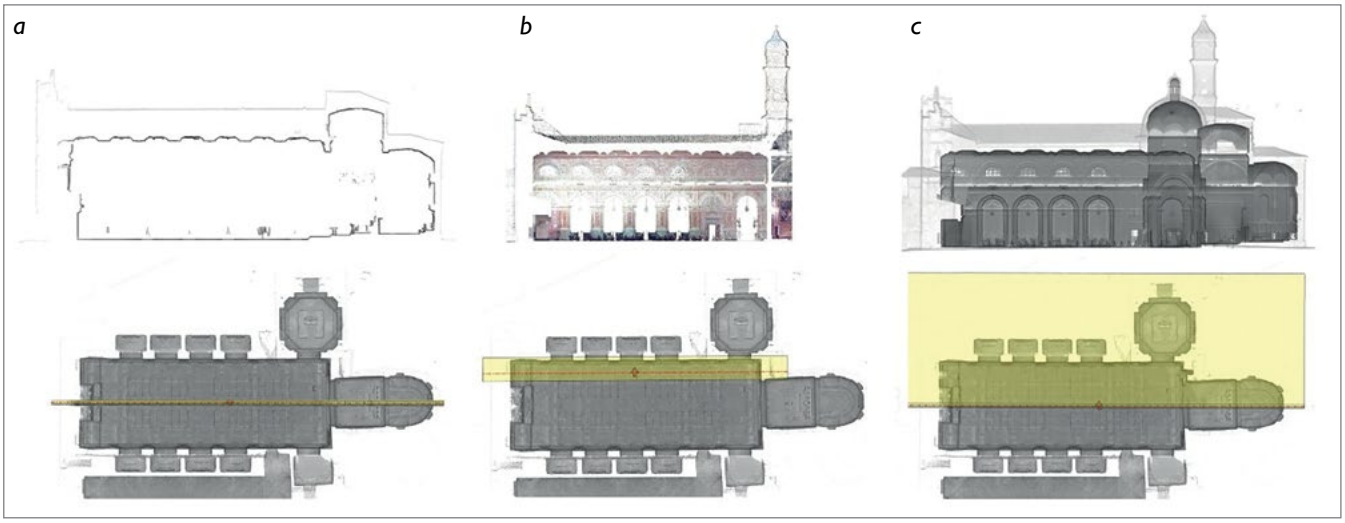


Figura 2. Processo di creazione degli ortopiani della nuvola 3D per la restituzione di elaborati 2D; individuazione della porzione di nuvola da considerare per la generazione della sezione e relativi profili estratti. Scelta del piano di sezione e della profondita di proiezione: (a) estrazione profilo di sezione; (b) estrazione di dettaglio delle porzioni in proiezione; (c) ortopiano completo di verifica e completamento delle parti di murature in proiezione della sezione architettonica.

tecnica mista GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e classica, determinata mediante stazione totale.
L'acquisizione con UAV e TLS è proposta come soluzione integrata efficace in architetture complesse[6], difatti consente di rilevare le porzioni interne ed esterne del corpo di fabbrica, ma anche di completare il rilievo di porzioni difficili da rilevare come sottosquadri e aggetti. Dal rilievo integrato è possibile ottenere dati che, opportunamente processati attraverso diverse fasi operative, consentono la creazione di elaborati architettonici bidimensionali a partire da una nuvola di punti. Già in fase di rilievo sono essenziali alcuni accorgimenti: la scelta delle posizioni di scansione terreste nonché la corretta pianificazione del volo UAV garantiscono il ricoprimento totale delle geometrie, mentre la misurazione di *Ground Control Points* (GCP) tramite tecniche topografiche tradizionali consente, nella fase di elaborazione, il corretto posizionamento e integrazione dei dati nel medesimo sistema di riferimento, oltre al controllo metrico dell'accuratezza del processo.
Le nuvole di punti generate da entrambi i sistemi devono quindi essere ottimizzate in primo luogo attraverso l'intervento manuale dell'operatore allo scopo di identificare e rimuovere le porzioni che presentano ricostruzioni imprecise e geometrie ridondanti. La conformazione spaziale della basilica, composta da un'unica grande aula con cappelle laterali, comporta che gli elementi architettonici siano in vista in quasi tutte le scansioni eseguite. Risulta importante sia rimuovere da ogni scansione i punti lontani in quanto già visibili in scansioni limitrofe, sia utilizzare opportuni filtri automatici di riduzione del rumore (errore accidentale), per ottenere l'ottimizzazione del modello 3D finale nel quale viene ridotta la ridondanza delle informazioni.
A seguito dell'elaborazione della nuvola di punti ottimizzata, è possibile ottenere elaborati grafici 2D generando ortopiani e profili di sezione da impiegare come base per la restituzione, che è interpretazione critica dei suddetti prodotti e tracciamento degli elementi architettonici e apparati decorativi secondo i canoni del disegno architettonico, realizzati attraverso l'uso dei software *PointCab* e *Autocad*. La corretta generazione dell'ortopiano è condizione fondamentale per la riuscita del processo. Tale scelta è affidata all'operatore che, attraverso l'immissione di coordinate specifiche, identifica nello spazio un piano soddisfacente le condizioni di parallelismo rispetto alla superficie presa in esame. Inoltre, risulta necessario scegliere la profondità della proiezione rispetto al piano di sezione, cioè la porzione di modello da considerare. Sono generati un primo ortopiano per ottenere gli elementi di muratura in sezione, impostando la profondità a pochi centimetri, e successivamente, altri ortopiani (in numero variabile), attraverso sezioni con profondità più ampia, per restituire le porzioni in proiezione (Figura 2). Combinando le ortofoto si procede con l'operazione di restituzione; tale azione è un atto consapevole di rilievo architettonico che deve inevitabilmente tenere conto della morfologia degli elementi architettonici, delle geometrie degli elementi di fabbrica, con attenzione a differenze e analogie. Il risultato di questo processo è un elaborato architettonico che descrive in modo ragionato e accurato il corpo di fabbrica (Figura 3), nel caso della Basilica il dettaglio raggiunto è quello della scala 1:50, come consueto quando la nuvola di partenza è ricca di informazioni di dettaglio in quanto derivata da TLS.

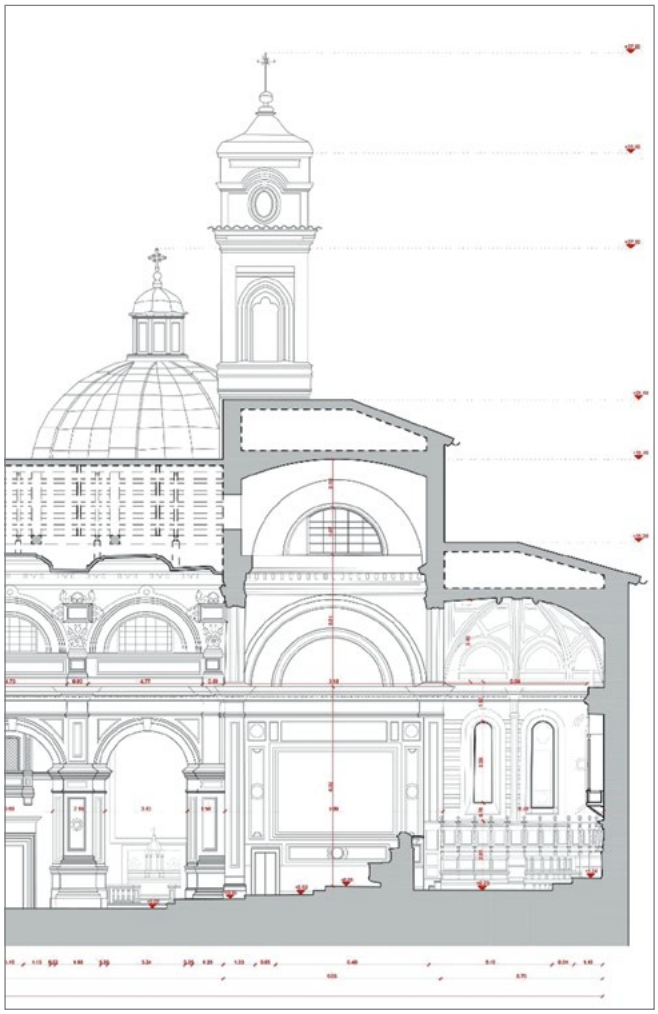


Figura 3. Stralcio di sezione architettonica realizzata sul modello 3D basato sulla nuvola di punti (originale scala 1:50).

2. Analisi spaziali dei modelli 3D continui (*mesh*)

A partire dalla nuvola di punti è possibile estrarre superfici continue *Triangulated irregular network* (TIN) – comunemente note come *mesh* – ottenute grazie all'impiego di software specifici; nel caso in esame *3D Reshaper* per la realizzazione della TIN e *Autodesk MeshMixer* per l'editing e le correzioni. Infatti, per ottenere migliori risultati anche la *mesh*, così come la nuvola di punti, deve essere trattata attraverso processi di ottimizzazione. Le operazioni da eseguire si basano *in primis* sulla segmentazione della nuvola a seconda delle differenti geometrie considerate, semplici come pareti e pavimenti oppure più complesse come volte e modanature o decorazioni (Figura 4). Tale operazione risulta

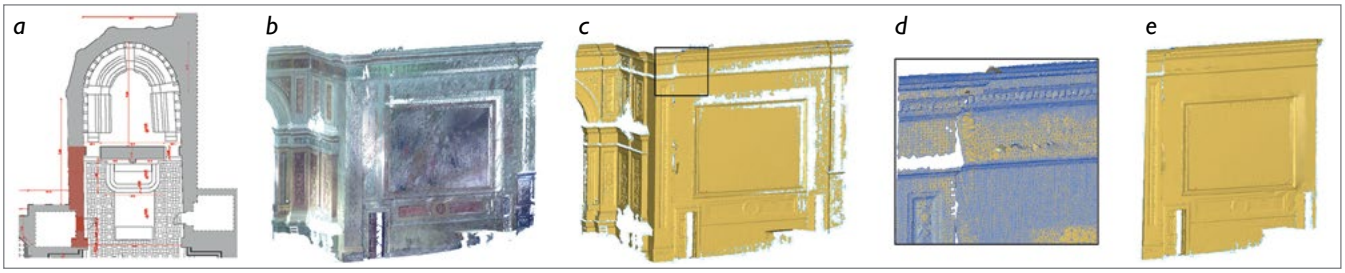


Figura 4. Processo di generazione di una superficie continua: (a) inquadramento della porzione di muratura considerata; (b) nuvola di punti; (c) mesh; (d) zoom di dettaglio della mesh; (e) correzione della mesh e isolamento della parete da analizzare.

necessaria per poter generare TIN con caratteristiche differenti a seconda della geometria della superficie: maggiore è la complessità della porzione considerata, maggiore sarà il numero di triangoli componenti la superficie continua; ciò si configura come un processo che prevede l'interpolazione a due passi attraverso l'uso di algoritmi che operano mediante parametri modificabili dall'operatore, che garantiscono, se opportunamente calibrati, l'ottenimento di risultati adeguati. A seguito della generazione della *mesh*, alcune operazioni consentono il riempimento di lacune, la correzione di imprecisioni e la riduzione del rumore al fine di completare, pulire e raffinare ciascuna *mesh* per poi unirle e ottenere un modello 3D unico. Tali passaggi non sono automatici, bensì sono azioni puntuali svolte in maniera consapevole dall'operatore che si avvale di diversi algoritmi specifici la cui applicazione deve essere testata continuamente, e che richiedono una conoscenza approfondita del processo.

Le potenzialità di indagine offerte da un modello 3D così ottenuto non sono limitate agli elaborati bidimensionali: infatti l'uso di nuvole di punti e TIN permette varie analisi. Calcolo di volumi, analisi di scostamenti, differenze cioè, tra le superfici considerate e altre che corrispondono a una geometria di progetto, anomalie di forma che possono essere ricondotte a dissesti strutturali sono alcune delle possibili applicazioni che offrono un sensibile supporto allo studio dei Beni architettonici[7], anche post-sisma.

La valutazione degli scostamenti da geometrie semplici di pareti o partizioni orizzontali può essere eseguita attraverso l'estrazione di profili di sezione, andando a quantificare l'angolo di inclinazione che le porzioni di superficie assumono rispetto a piani o assi adottati come riferimenti (per esempio scostamenti dalla verticale per valutare i fuori piombo); ciò può avvenire utilizzando la nuvola di punti oppure la TIN. Tali analisi sono utili anche per valutare quanto le anomalie possano configurarsi come deformazioni occorse alla struttura. Le analisi eseguite su base TIN indagano lo scostamento dell'intera superficie rilevata da un piano scelto dall'utente tramite una valutazione delle distanze. Associando una scala di colore al variare della distanza è possibile quindi identificare le aree che maggiormente si discostano dal piano; esplicativa è la porzione della muratura laterale del presbiterio all'innesto con il transetto (Figura 5) o la porzione del soffitto a cassettoni a copertura della navata nel suo innesto con il presbiterio (Figura 6).

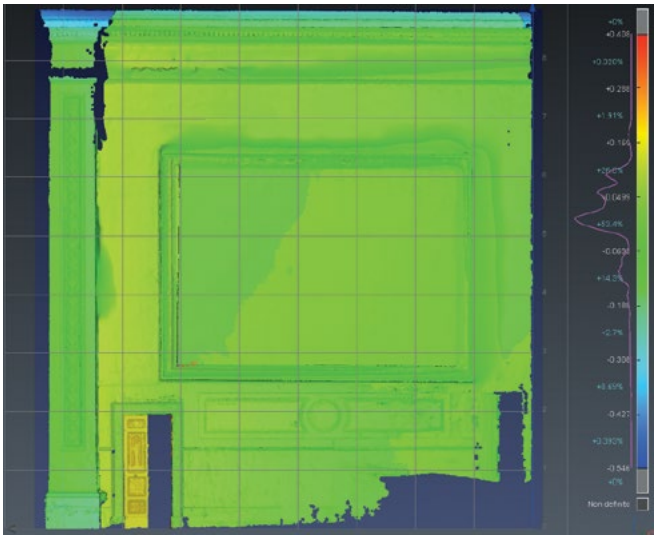


Figura 5. Analisi di scostamento della parete del presbiterio da una superficie verticale. Il 63% dei punti della parete concide sostanzialmente con la superficie verticale, ed escludendo le cornici aggettanti, una percentuale di circa il 20% devia dal piano verticale per valori sino a poco più di 5 cm.

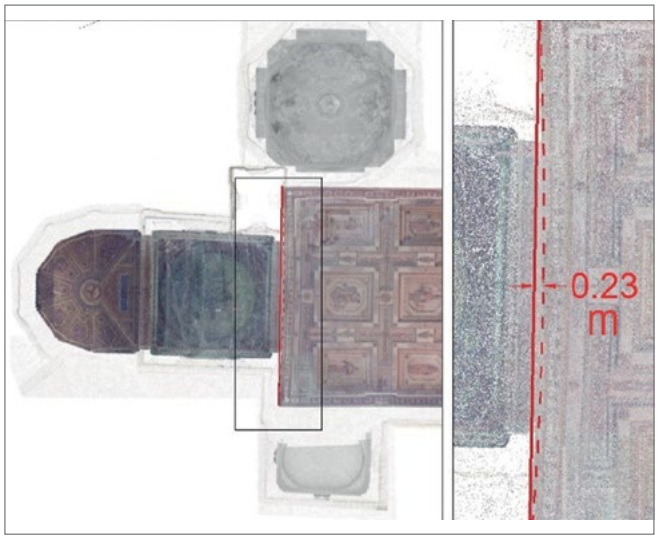


Figura 6. Analisi di scostamento del soffitto a cassettoni della navata nella porzione di innesto con la sezione presbiteriale, studiata dagli ingegneri delle strutture proprio per il suo allontanamento dal corpo principale della chiesa.

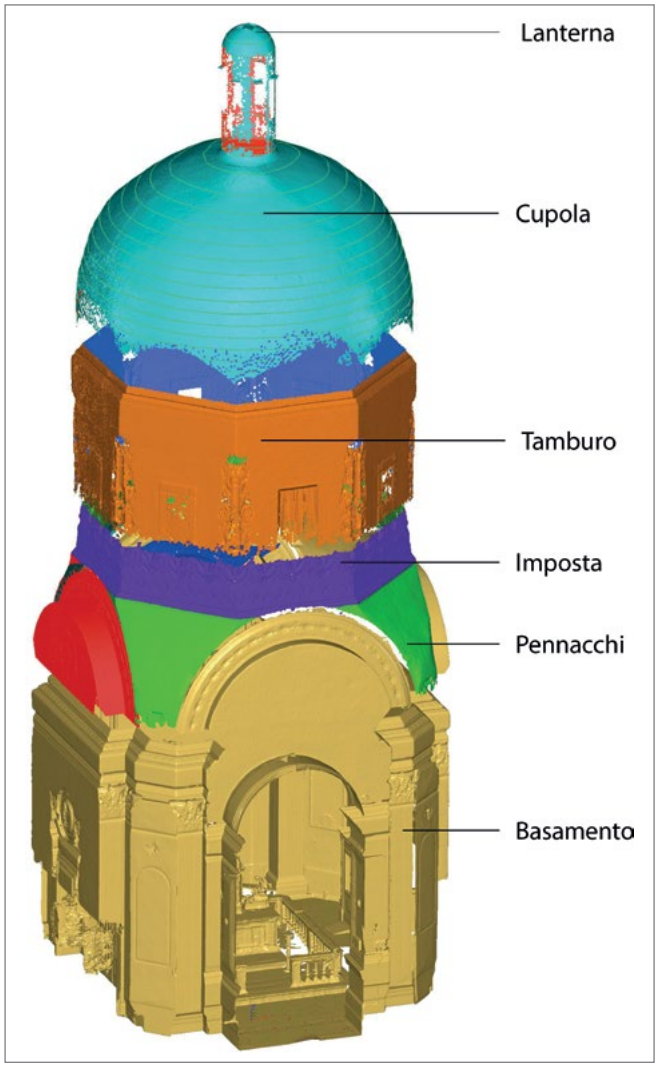


Figura 7. Segmentazione del modello 3D. Scomposizione degli elementi architettonici.

Per quanto riguarda geometrie più complesse, si riporta il caso della superfice dell'intradosso della cupola semisferica della Cappella del SS. Sacramento. In un primo momento è stata eseguita la classificazione della TIN in elementi architettonici semplici (Figura 7). Le analisi eseguibili possono riguardare le deviazioni delle superfici stimate analiticamente, ma anche semplici estrazioni di profili di sezione. È stata definita per via analitica la geometria sferica ideale in grado di ridurre le deviazioni al minimo e adattarsi al meglio alla geometria reale della cupola. Quest'analisi ha permesso di ottenere una mappatura cromatica per facilitare l'identificazione delle aree che presentano uno scostamento tra la geometria rilevata e quella analitica di riferimento (Figura 8). Mentre in alcuni casi, le cause di scostamenti si possono imputare a una messa in opera non perfetta, nel caso presente (massimo 13 cm), alla luce anche delle osservazioni strutturali del team del monitoraggio, si riconosce il cedimento post-sisma. L'estrazione invece di sezioni a passo costante (Figura 9) permette di ottenere un controllo accurato dell'andamento delle superfici in diverse direzioni, in generale orizzontale e verticale. La scelta del passo di estrazione risulta di fondamentale importanza in base alle finalità dell'indagine eseguita: nel caso in esame si è optato per una equidistanza di 30 cm, consentendo la comparazione della sezione reale con l'ipotetica geometria ideale e la valutazione dell'andamento delle discontinuità sezione per sezione (Figura 10).

Considerazioni conclusive

L'analisi comparata di elaborati 2D e le analisi di scostamento 3D hanno permesso di quantificare le conseguenze dei meccanismi di distacco delle murature della zona presbiterale dal corpo centrale della navata, simili al ribaltamento

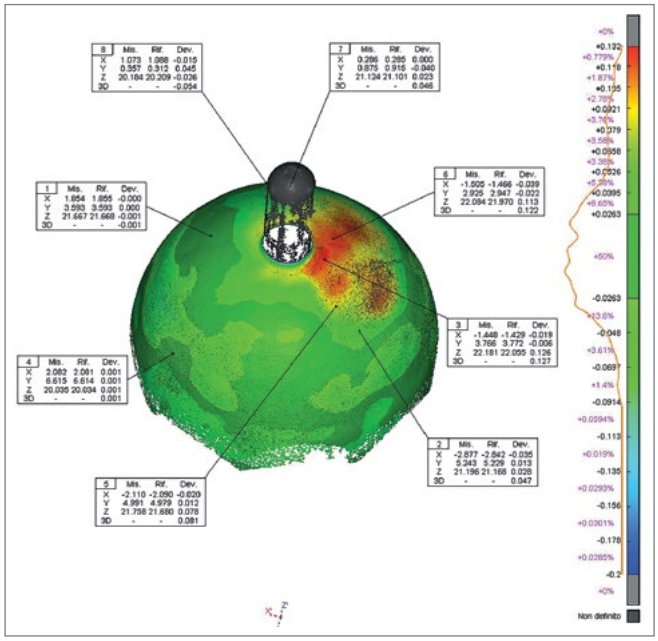


Figura 8. Mappatura cromatica del discostamento tra la geometria rilevata e la sfera generata analiticamente.

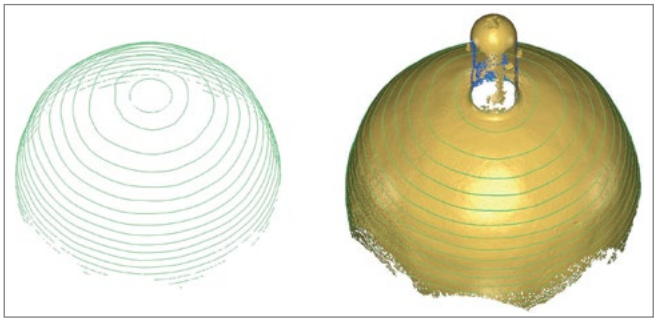


Figura 9. Estrazione di profili di sezione a passo costante per l'analisi su piani orizzontali.

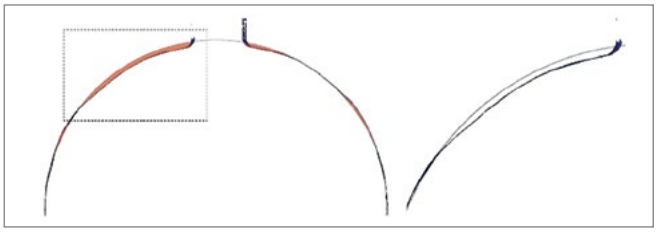


Figura 10. Analisi di un profilo di sezione. Analisi delle deviazioni tra la superficie di rilievo e semisfera analitica.

della facciata, contribuendo a supportare la pianificazione del monitoraggio dinamico strutturale effettuato dal gruppo di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica. L'analisi interdisciplinare si è rilevata di grande importanza e interesse, i dati derivanti dal monitoraggio sono stati combinati con il modello 3D derivante dal rilievo geometrico per la creazione di un modello agli elementi finiti[8]. L'utilizzo dei modelli 3D non è limitato alle rappresentazioni architettoniche e alle analisi spaziali delle superfici finora presentate; su questo stesso modello è infatti possibile proiettare immagini orientate dal punto di vista fotogrammetrico, ottenendo un modello 3D testurizzato ad alta risoluzione aggiungendo l'informazione tematica del colore (RGB) al dato geometrico. Questi modelli si prestano ad essere utilizzati per finalità comunicative e divulgative permettendo esperienze immersive tramite visualizzatori online o esperienze in *Virtual Reality*[9]. Infine, attraverso software di visualizzazione 3D, come 3D Studio Max, 3D Reshaper o Autodesk Recap, è possibile realizzare filmati in alta definizione creando navigazioni dei modelli 3D per lo studio e la divulgazione dei beni culturali

Note

[1] Isabel Martínez-Espejo Zaragoza, Gabriella Caroti, Andrea Piemonte, Björn Riedel, Dieter Tengen, Wolfgang Niemeier, *Structure from motion (SfM) processing of UAV images and combination with terrestrial laser scanning, applied for a 3D-documentation in a hazardous situation*, in «Geomatics, Natural Hazards and Risk», 8, 2, 2017, pp. 1492-1504; DOI: 10.1080/19475705.2017.1345796. Görres Grenzdörffer, Matthias Naumann, Frank Niemeyer, Annet Frank, *Symbiosis of uas photogrammetry and TLS for surveying and 3d modeling of cultural heritage monuments - a case study about the cathedral of St. Nicholas in the city of Greifswald*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XL-1/W4, 2015, pp. 91-96; DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-91-2015.

[2] Valeria Croce, Gabriella Caroti, Andrea Piemonte, Assessment of earthquake-induced damage level on buildings: analysis of two different survey methods for a case study, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W15, 2019, pp. 351-358; DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-351-2019. Filiberto Chiabrando, Andrea Di Lolli, Giacomo Patrucco, Antoni Spanò, Giulia Sammartano, Lorenzo Teppati Losè, Multitemporal 3d modelling for cultural heritage emergency during seismic events: damage assesment of S. Agostino church in Amatrice (RI), in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-5/W1, 2017, pp. 69-76; DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-69-2017.

[3] Centro Studi Agostino Trapè (a cura di), *La Basilica di San Nicola a Tolentino. Guida all'arte e alla storia*, Biblioteca Egidiana, Tolentino, 2008.

[4] Cfr. in questo volume il contributo a p. 102. Si vedano inoltre: Donato Sabia, Takayoshi Aoki, Daniele Costanzo, Renato Lancellotta, Antonino Quattrone, *Post-earthquake dynamic monitoring of Basilica of St. Nicholas of Tolentino*, in Atti del XVII convegno ANIDIS. *L'ingegneria sismica in Italia*, Pistoia, 2017. Daniele Costanzo, Filiberto Chiabrando, Renato Lancellotta, Andrea Lingua, Antonino Quattrone, Donato Sabia, Antonia Spanò, *Rilievo 3D e monitoraggio strutturale per l'analisi post-sisma del complesso di S. Nicola a Tolentino (MC)*, in Atti della XXI conferenza nazionale ASITA, 2017, pp. 315-323.

[5] Parte degli elaborati e delle analisi del presente contributo, come quelli rappresentati nelle figure 1, 2, 3, 8, 9, 10, sono stati realizzati nell'ambito dell'esercitazione didattica del workshop *Fotogrammetria digitale e scansioni 3D per la documentazione del patrimonio* (referenti N. Spanò, F. Chiabrando; allievi: Giulia Curreli, Davide Einaudi, Mauro Fontana, Giulia Piras). Altri approfondimenti dell'analisi dei modelli 3D sono direttamente legati allo sviluppo delle indagini da parte degli autori come componenti della task force del Politecnico per il terremoto in Centro Italia.

[6] Filiberto Chiabrando, Giulia Sammartano, Antonia Spanò, Alessandra Spreafico, *Hybrid 3D Models: When Geomatics Innovations Meet Extensive Built Heritage Complexes*, in «International Journal of Geo Information», 8 (3) 124, 2019; DOI: 10.3390/ijgi8030124.

[7] Antonia Spanò, Filiberto Chiabrando, Elisabetta Donadio, Giulia Sammartano, *La tecnologia laser scanning per la valutazione statica delle strutture storiche*, in «GEOmedia», 4, 2016, pp. 12-17.

[8] Cfr. ancora in questo volume il contributo a p. 102.

[9] Carla Boriello, *From point cloud based models to VR visualization for Cultural Heritage at risk: St. Nicola Church in Tolentino*, tesi di laurea magistrale in Architettura per il restauro e la valorizzazione del patrimonio, Politecnico di Torino, relatori Filiberto Chiabrando, Antonia Spanò, luglio 2018.

BY-NC-SA

Tecniche di acquisizioni fotogrammetriche per il rilievo speditivo utilizzando una Steadycam commerciale

Photogrammetric acquisition techniques for rapid mapping using a commercial Steadycam

GIACOMO PATRUCCO, ALESSIO CALANTROPIO, GIULIA SAMMARTANO, LORENZO TEPPATI LOSÈ

Giacomo Patrucco, dottorando in Beni architettonici e paesaggistici, Politecnico di Torino
giacomo.patrucco@polito.it

Alessio Calantropio, dottorando in Beni architettonici e paesaggistici, Politecnico di Torino
alessio.calantropio@polito.it

Giulia Sammartano, dottore di ricerca in Beni architettonici e paesaggistici, assegnista in Geomatica presso il Politecnico di Torino, DAD
giulia.sammartano@polito.it

Lorenzo Teppati Losè, dottore di ricerca in Beni architettonici e paesaggistici, assegnista in Geomatica presso il Politecnico di Torino, DAD
lorenzo.teppati@polito.it

Abstract
La rapidità di acquisizione nell'ambito del rilievo metrico 3D è un aspetto fondamentale, soprattutto per quanto riguarda contesti post-emergenziali, che spesso sono connotati da elevata pericolosità; negli ultimi anni, proprio per questo motivo, diverse ricerche applicate sono state sviluppate al fine di ottimizzare nuove metodologie di *mapping* rapide, flessibili e low-cost. Durante questa ricerca è stata testata una steadycam commerciale con la quale sono stati acquisiti in maniera speditiva dei fotogrammi del soffitto ligneo della Basilica di San Nicola a Tolentino, al fine di valutare l'utilizzo di questo strumento per scopi fotogrammetrici come possibile soluzione speditiva ed economica.

In the framework of 3D metric survey, the rapidity of the acquisition is a fundamental aspect, especially as regards post-emergency situations; those conditions are often characterised by high risk, for this reason, in the last few years several researches have been developed in order to optimise new flexible and low-cost rapid mapping methodologies. As part of this study, a commercial steadycam has been tested for photogrammetric purposes in order to collect digital images of the coffered wooden ceiling of the Basilica of San Nicola, with the aim to evaluate the suitability of this device as a possible rapid and low-cost mapping solution.

Introduzione

Gli eventi sismici che si sono verificati in centro Italia nel 2016 hanno evidenziato quanto il nostro patrimonio costruito sia fragile e quanto sia pertanto necessaria una corretta documentazione dei beni culturali a rischio, in particolare in contesti post-emergenziali, in modo da poter fornire un supporto adeguato a coloro che operano all'interno della gestione del disastro. In tal senso, i contributi che la geomatica può fornire con i suoi strumenti sono molteplici, dalla realizzazione di cartografia speditiva alla realizzazione in tempi contenuti di modelli 3D sui quali visualizzare eventuali danni e lesioni.
Un aspetto fondamentale che va considerato in questo specifico ambito del rilievo metrico 3D è appunto il carattere speditivo delle soluzioni adottate, e questo appare quanto mai evidente in contesti connotati da elevato rischio, dove la permanenza sul sito deve essere necessariamente ridotta al minimo e i risultati devono essere elaborati in tempi ristretti.
Inoltre, accanto all'esigenza legata alla rapidità delle soluzioni adottate, vi è anche la necessità di sviluppare soluzioni di tipo low-cost[1], maggiormente accessibili a un'utenza più ampia e sostenibili economicamente. Per questo motivo, andando ad affiancare soluzioni più consolidate (e spesso molto costose),

Figura 1. Fronte della basilica di San Nicola a Tolentino.

Figura 2. Soffitto ligneo a lacunari della basilica.

negli ultimi anni si stanno affermando sul mercato in misura sempre maggiore nuove tecnologie low-cost in grado di rispondere efficacemente a tali esigenze (smartphone, tablet, camere 360° e action cam)[2]. Esse, grazie ai continui miglioramenti degli algoritmi legati alla fotogrammetria digitale, offrono la possibilità di ottenere prodotti metrici di elevata qualità. Infine, un ultimo aspetto che vale la pena sottolineare riguarda la flessibilità a cui puntano queste nuove metodologie in rapido sviluppo, basata su diverse caratteristiche, tra cui l'adattabilità in diversi contesti, la maneggevolezza dei dispositivi e la facilità di utilizzo.

Per questo motivo durante la ricerca presentata è stato preso in considerazione l'utilizzo di una *steadycam* commerciale come possibile soluzione speditiva per l'acquisizione di dati per scopi fotogrammetrici[3]. Per poter valutare correttamente i dati ottenuti grazie a questa *steadycam* sono state inoltre eseguite altre due acquisizioni con sensori maggiormente consolidati: è stato eseguito un rilievo fotogrammetrico tradizionale con una camera DSLR (*Digital Single Lens Reflex*) e diverse scansioni 3D utilizzando un laser scanner.

Il caso studio è il soffitto ligneo a lacunari della Basilica di San Nicola a Tolentino (Figura 1), compresa, come ormai è noto dai precedenti contributi, nelle aree che a partire dall'agosto 2016 sono state colpite dagli eventi sismici. In particolare, il soffitto a cassettoni della navata centrale (Figura 2), è connotato da un apparato decorativo sia ricco di dettagli figurati (santi), sia di intarsi articolati ad altorilievo e particolari architettonici con spiccata configurazione tridimensionale[4]; queste caratteristiche, insieme alla sua posizione particolarmente elevata (quasi 15 m dal piano di calpestio della chiesa) e alla illuminazione non ottimale, rendono questa esperienza di modellazione 3D da rilievo fotogrammetrico particolarmente interessante per le difficoltà da affrontare.

1. Acquisizione ed elaborazione dei dati con DJI OSMO+

Il sensore testato durante questa ricerca è una *steadycam* low-cost modello DJI OSMO+. Si tratta di una camera da 12,4 Mp con lunghezza focale di 4 mm (22-77 mm equivalente) stabilizzata grazie ad un *gimbal*[5] motorizzato a 2 assi (Figura 3).

Durante il rilievo, il sensore portatile, sostenuto da un operatore che ha camminato svariate volte lungo la navata della chiesa con la camera orientata con asse perpendicolare rispetto al soffitto, è stato in grado di acquisire un video in 4K (24 frame al secondo) dal quale sono stati successivamente estratti 328 frame (1 frame al secondo). Al fine di simulare una situazione di rischio elevato, e dunque massimizzare la rapidità dell'acquisizione, l'assetto della camera è stato mantenuto solo nadirale, senza acquisire immagini oblique. L'intero procedimento ha richiesto in tal modo circa cinque minuti.

Per quanto riguarda il rilievo eseguito con la camera DSLR, è stata utilizzata una Canon EOS 5D Mark II, equipaggiata con un obiettivo 24-70 mm con focale bloccata su 24 mm; le immagini sono state acquisite con l'ausilio di un treppiede fotografico. In tutto sono state acquisite 84 immagini (sia con orientamento parallelo al cassettonato che inclinato a ≈ 45°). Per questa operazione sono stati necessari circa 80 minuti.

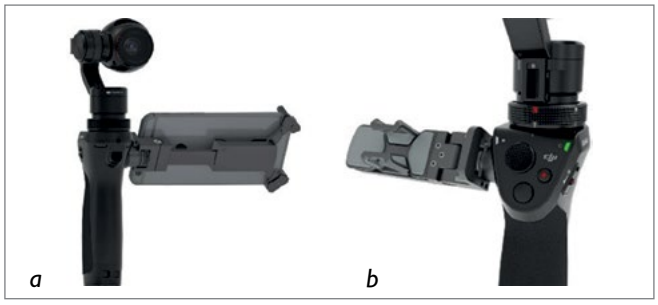


Figura 3. DJI OSMO nell'insieme (a) ed in un suo dettaglio (b).

Infine, in relazione alle scansioni laser, è stato impiegato un laser scanner a differenza di fase Faro Focus^{3D} della CAM2. È stato ovviamente sfruttato il rilievo laser scanning realizzato per la documentazione dell'interno della chiesa[6], che contava 17 scansioni (distribuite omogeneamente lungo la navata). In questo caso il tempo necessario è stato di circa tre ore. Le scansioni sono state successivamente unite tra loro grazie ad una procedura consolidata che prevede dapprima un allineamento di tipo *cloud-to-cloud* e in seguito la georeferenziazione del blocco di scansioni grazie a dei punti misurati con metodi topografici classici mediante una rototraslazione rigida[7].
I fotogrammi di entrambi i dataset sono stati invece processati con un software basato su algoritmi di tipo *Structure-from-Motion* (SfM) seguendo la metodologia tradizionale: orientamento dei fotogrammi, generazione di una nuvola sparsa di *tie-points* e generazione di una nuvola di punti densa[8]. Considerando gli errori residui sui punti di controllo misurati con stazione totale (7,3 mm per il dataset della camera DSLR e 8,8 mm per quello della *steadycam*) si può constatare la coerenza dei due risultati ottenuti.

2. Analisi e discussione dei risultati

In seguito all'elaborazione di questi dati è stato possibile ottenere diversi prodotti metrici: il modello 3D texturizzato (Figura 4), il DSM (*Digital Surface Model*), e l'ortofoto del soffitto a cassettoni (Figura 5). Come già accennato questi elaborati, tipici prodotti del rilievo metrico 3D, sono di fondamentale importanza per quanto riguarda la gestione del disastro e contribuiscono a fornire un valido supporto in contesti di emergenza; pertanto, l'obiettivo in questo caso è consistito nell'analizzare i prodotti elaborati a partire dal dataset della *steadycam* e valutare in che misura fossero competitivi rispetto a quelli degli altri sensori e se fossero adatti a fornire un supporto adeguato durante un contesto emergenziale.

	Media ass.	Dev. St.	Min	Max
Tutti	0,012	0,008	0,000	0,036
● A	0,009	0,005	0,000	0,021
◆ B	0,017	0,009	0,002	0,036
▲ C	0,010	0,006	0,003	0,018

Tabella 1. Valori statistici dei residui sui punti di controllo rispetto alla loro distribuzione sul soffitto (tutti i valori sono espressi in metri).

Come si può osservare nella Figura 4, il modello 3D ottenuto dalla nuvola di punti generata dai fotogrammi acquisiti con la *steadycam* è caratterizzato da una risoluzione apprezzabile e un buon livello di dettaglio; inoltre anche la qualità radiometrica della texture è di buona qualità, anche considerando l'illuminazione non ottimale riscontrata all'interno della chiesa durante l'acquisizione del video.
I DSM ottenuti da entrambi gli approcci fotogrammetrici sono stati confrontati in ambiente GIS per verificare le discrepanze sulla coordinata z. Dal momento che il soffitto a cassettoni è connotato da un'elevata tridimensionalità – l'ampiezza in sezione verticale del soffitto a lacunari è di circa 1 m – i punti di controllo sono stati distribuiti, con riferimento alla figura 5, dal basso verso l'alto: in parte sulle cornici (punti gialli), in parte sui profili decorativi cruciformi (punti arancioni) e in parte sulle decorazioni rappresentanti i santi (punti verdi). In Tabella 1 è possibile osservare gli errori residui: anche in questo caso il risultato ottenuto con la *steadycam* confrontato con quello ottenuto dal rilievo fotogrammetrico tradizionale da camera DSLR può essere considerato positivamente.
Per quanto riguarda la definizione e il livello di dettaglio dei modelli 3D, alcune analisi sono state condotte su un'area campione dell'apparato decorativo, nella fattispecie un modulo composto da tre cassettoni. In particolare, sono

Figura 4. Dettaglio del modello 3D (texturizzato e non texturizzato) di un lacunare: (a) modello generato da camera DSLR; (b) modello generato da steadycam.

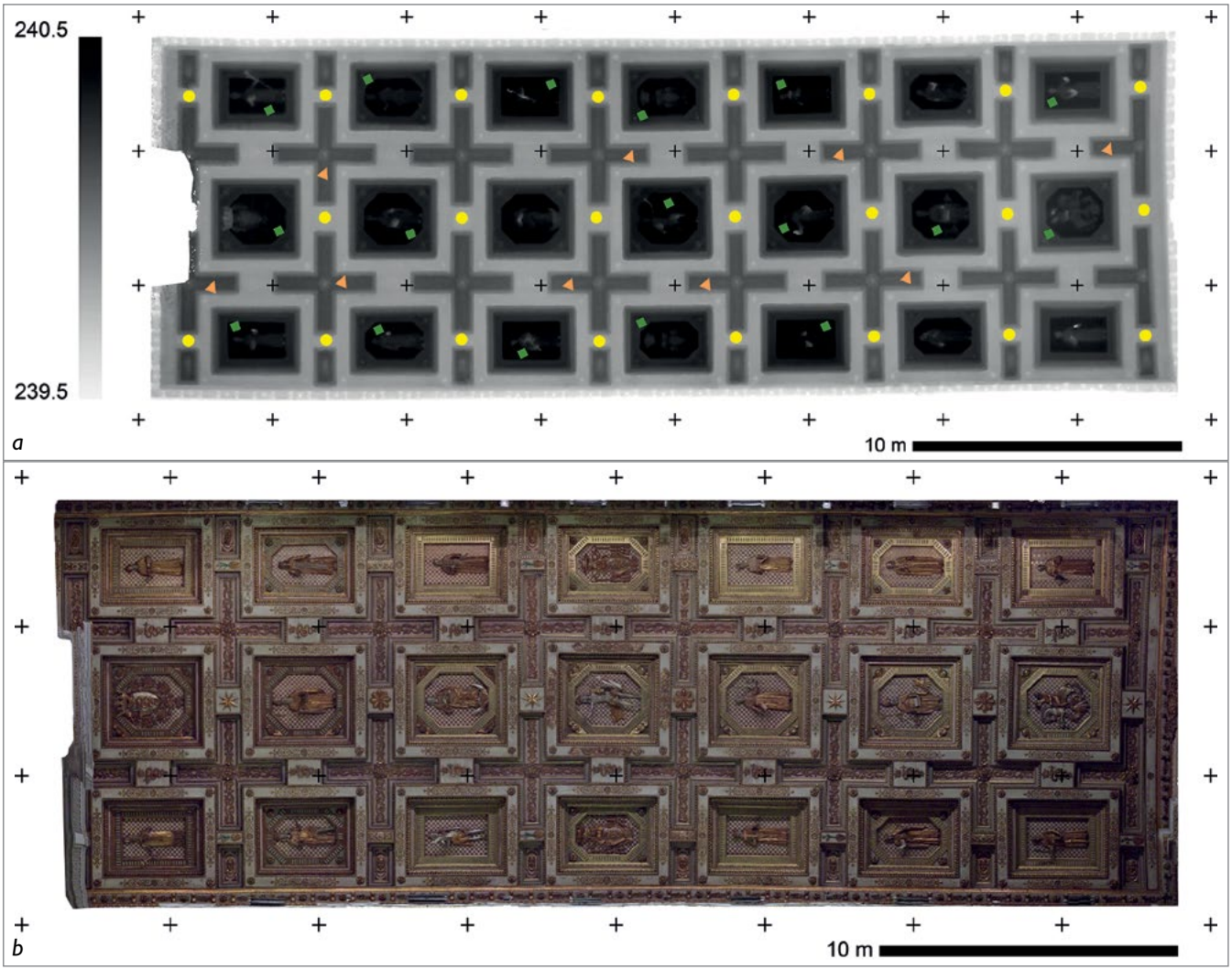


Figura 5. Ortofoto del soffitto cassettonato della Basilica (a) e DSM con evidenziati i punti di controllo selezionati sulla superficie rilevata (b).

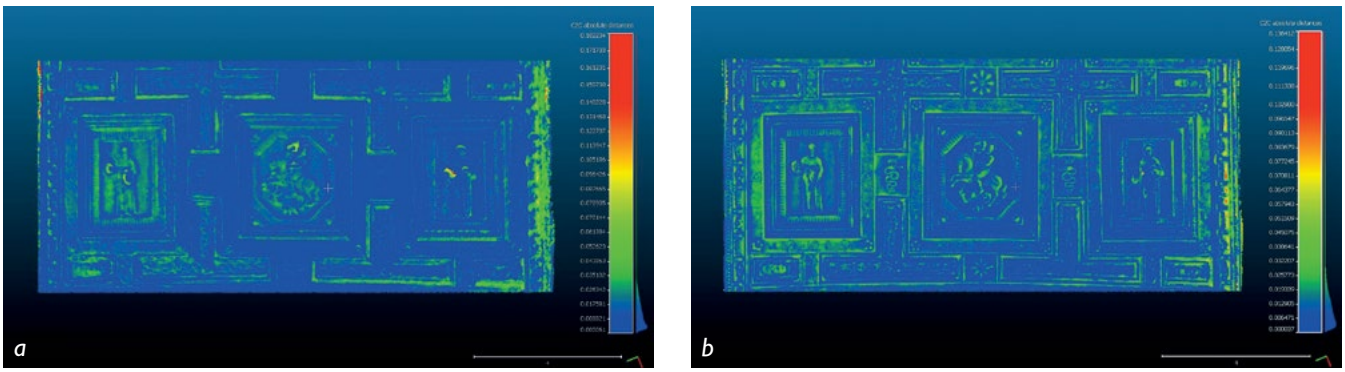


Figura 6. Analisi delle differenze tra i diversi dataset: (a) modello steadcam/modello da camera DSLR. (b) modello steadycam/modello LiDAR. Le superfici in blu sono quelle che presentano scostamenti tra 0 e 1,5 cm; in quelle in verde le differenze sono maggiori e si attestano tra 1,5 cm e 3-4 cm. Le superfici evidenziate in verde intenso-giallo-rosso presentano delle differenze maggiori e sono relative alle porzioni di modello che presentano errori topologici (solitamente situate nelle aree esterne a causa della minore sovrapposizione delle immagini).

state misurate le discrepanze esistenti tra le diverse nuvole di punti (quella ottenuta da *steadycam* e quelle generate utilizzando sensori consolidati) al fine di valutare la risoluzione e la definizione geometrica (Figura 6). Rispetto alla nuvola di punti acquisita con il laser scanner che è quella maggiormente dettagliata delle tre calcolate, la definizione della

Differenze [m]	Media	Dev. St.	Min	Max
Steadycam vs. DSLR	0,014	0,010	0,000	0,182
Steadycam vs. LiDAR	0,012	0,009	0,000	0,136

Tabella 2. Differenze tra i diversi dataset analizzati.

superficie del soffitto nel modello derivato da *steadycam* è penalizzata dalla distanza di ripresa elevata (circa 13 m, considerando l'altezza di più di 14,5 m del soffitto dal piano di calpestio, e l'altezza da terra della presa del dispositivo da parte dell'operatore), dall'elevata tridimensionalità dei cassettoni e dalla scarsa illuminazione riscontrata nella chiesa durante la fase di acquisizione. Tuttavia, anche se la definizione è certamente inferiore rispetto alla nuvola acquisita da laser scanner, le geometrie dei particolari dei cassettoni sono state correttamente ricostruite consentendo un'adeguata documentazione del manufatto architettonico in questione.

Conclusioni

Durante questa ricerca sono stati eseguiti dei confronti tra i diversi dataset presentati al fine di valutare la competitività della *steadycam* per il rilievo 3D speditivo, considerando sia l'aspetto operativo legato alla fase di acquisizione che la qualità dei prodotti finali, che potenzialmente potrebbero servire a supportare attività di salvataggio dei beni artistici o architettonici durante situazioni di emergenza.

La velocità di acquisizione è sicuramente un punto forte di questo sensore, dal momento che sia il laser scanner che la camera DSLR hanno richiesto tempi molto maggiori. Inoltre, la maneggevolezza e la facilità di utilizzo consentono l'impiego anche da parte di operatori meno esperti. Al netto di alcuni aspetti critici osservati durante lo svolgimento della ricerca – tra cui la scarsa durata della batteria, inadatta a rilievi di lunga durata, e la necessità di calibrare frequentemente il *gimbal* – i prodotti ottenuti a partire dal dataset acquisito con la *steadycam* sono estremamente competitivi. Nonostante il livello di dettaglio e definizione geometrica sia inferiore a quello del laser scanner e, in misura minore, a quello della camera DSLR, l'accuratezza metrica e la qualità complessiva dei prodotti generati è più che accettabile e contribuisce al giudizio positivo del DJI OSMO+ come possibile soluzione per l'acquisizione fotogrammetrica speditiva.

Note

[1] Stelios Kossieris, Olympia Kourounioti, Panagiotis Agrafiotis, Andreas Georgopoulos, *Developing a low-cost system for 3D data acquisition*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», vol. 42, 2017, pp. 119-126.

[2] Fausta Fiorillo, Marco Limongiello, Belén Jiménez Fernández-Palacios, *Testing GoPro for 3D model reconstruction in narrow spaces*, in «ACTA IMEKO», vol. 5, n. 2, 2016, pp. 64-70. Roman Shults, *New opportunities of low-cost photogrammetry for cultural heritage preservation*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», vol. 62, 2017, pp. 481-486.

[3] Questo lavoro è già stato presentato dagli stessi autori alla Conferenza nazionale SIFET nel 2017, essendo selezionato come migliore per il Premio Poster nella categoria "Terremoti ed Emergenze". La stessa ricerca è stata quindi presentata in: Alessio Calantropio, Giacomo Patrucco, Giulia Sammartano, Lorenzo Teppati Losè, *Low-cost sensors for rapid mapping of cultural heritage: first tests using a COTS Steadicamera*, in «Applied Geomatics», 10, 2018, pp. 31-45; DOI: 10.1007/s12518-017-0199-6.

[4] Il soffitto fu realizzato dal 1605 al 1628 dal maestro intagliatore Filippo da Firenze coadiuvato da suo figlio Piero, ed è così descritto: «Capolavoro di ebanisteria barocca – unico nelle Marche – si sviluppa per una lunghezza di più di 38 metri, spartito in ventuno cassettoni su file di tre e perimetrato da una ricca trabeazione ad ovoli e dentelli sorretta da mensole con modiglioni a gola dritta, alternatamente intercalate da rosoncini e da biscioni viscontei, che compaiono peraltro anche nei riquadri che collegano i singoli lacunari lateralmente fra loro. Nel fondo dei lacunari – alcuni scorniciati ad ottagono – su di un tappeto a scacchiera rosso e bianco, risaltano alternativamente ora lo stemma vescovile ora diciotto statue di santi, a grandezza superiore al naturale, oltre a quella centrale del Cristo Redentore e quella della Madonna. Tutte le superfici sono indurate a zecchino [...]»; Fabio Mariano, *Soffitto ligneo*, in Centro Studi Agostino Trapè (a cura di), *La Basilica di San Nicola a Tolentino. Guida all'arte e alla storia*, Biblioteca Egidiana, Tolentino 2008.

[5] Un *gimbal* è un dispositivo che serve a stabilizzare un oggetto (di solito una camera fotografica o una videocamera), ammortizzando e riducendo le vibrazioni causate dal movimento dell'operatore. Quello utilizzato nella ricerca presentata è a 2 assi, ovvero contribuisce alla stabilizzazione sugli assi X e Y; esiste, per il modello di steadycam utilizzato, un ulteriore accessorio che provvede alla stabilizzazione anche per quanto riguarda l'asse Z, come consueto anche nei droni.

[6] Cfr. in questo volume il contributo a p. 102.

[7] Filiberto Chiabrando, Vincenzo Di Pietra, Andrea Lingua, Paolo Maschio, Francesca Noardo, Giulia Sammartano, Antonia Spanò, *TLS models generation assisted by UAV survey*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», vol. 41, 2016, pp. 413-420.

[8] Dettagli sui principi della fotogrammetria digitale sono stati forniti a partire dal primo contributo di Geomatica. Cfr. in questo volume il contributo a p. 41.

BY-NC-SA

Scansioni laser basate su tecnologia SLAM per documentazione estensiva del convento di San Nicola a Tolentino

SLAM-based mapping technology for extensive documentation of the San Nicola in Tolentino convent

GIULIA SAMMARTANO, NANNINA SPANÒ, ALICE ACCORNERO

ABSTRACT

Come già evidenziato in altri contributi, tra le tecnologie di mapping rapido, i sistemi di scanner portatili terrestri basati sulla tecnologia SLAM (*Simultaneous localization and Mapping*) rivestono un ruolo di particolare rilevanza nello scenario attuale delle tecniche che consentono una documentazione 3D basata su nuvole di punti. Mentre in altre sezioni di questo volume è stata evidenziata la flessibilità del loro uso a integrazione e completamento di altre tecniche di rilievo 3D, in questo contributo viene evidenziata la loro capacità di eseguire rilievi tridimensionali estensivi sull'architettura storica tradizionale, caratterizzata da vani consecutivi e piuttosto ripetitivi quali quelli di un convento, oltreché del non risentire, in termini di accuratezza globale, di percorsi che si snodano lungo diversi livelli di fabbrica. Tale circostanza conduce le autrici a ritenere che nel prossimo futuro, una volta abbattuti i costi della strumentazione, a oggi non considerabile pienamente *low cost*, essi potranno forse essere impiegati abitualmente nel rilievo edilizio.

As already underlined in other contributions, among the rapid mapping technologies, terrestrial portable scanner systems based on SLAM (Simultaneous localization and Mapping) technology play a particularly important role in the current scenario of techniques that allow 3D documentation based on point clouds. While in other sections of this volume the flexibility of their use to integrate and complement other 3D survey techniques has been pointed out, this contribution draw attention to their ability to perform three-dimensional, extensive surveys on traditional historical architecture, characterized by consecutive spaces and rather repetitive, such as those of a convent. This is valid as well as the SLAM-based mobile scanning technology is not influenced in terms of overall accuracy, by paths that wind along different factory levels. This circumstance leads the authors to believe that in the near future, once the costs of the instrumentation, which cannot be considered fully low cost up to now, they can perhaps be used habitually in the building survey.

Giulia Sammartano, dottore di ricerca in Beni architettonici e paesaggistici, assegnista in Geomatica presso il Politecnico di Torino, DAD
giulia.sammartano@polito.it

Nannina Spanò, professore associato di Geomatica, Politecnico di Torino, DAD
antonia.spano@polito.it

Alice Accornero, laureata magistrale in Architettura per il progetto sostenibile, Politecnico di Torino
aliceaccornero@yahoo.it

1. Il sistema dello scanner portatile nel panorama delle tecnologie rapide

L'efficienza e la rapidità dei metodi di rilievo del costruito, particolarmente in condizioni di rischio e di ridotta accessibilità, sono talvolta aspetti decisivi per l'impiego e diffusione delle nuove tecnologie a partire dai settori della ricerca e sviluppo verso il loro utilizzo nelle reali circostanze della pratica architettonica ed edilizia, nel pronto intervento e rilievo del danno oltre che negli altri molteplici campi applicativi cui attualmente gli approcci della Geomatica sono votati. In particolare, l'urgenza di ridurre i tempi di acquisizione dati (che sia per un'economia di risorse, o per limitare l'esposizione ai rischi dei luoghi che si

devono documentare) insieme alla necessità di massimizzare la ricchezza e la continuità di dati metrici e radiometrici in fase di misura, ha fatto sì che negli ultimi decenni l'impiego di sistemi a scansione LiDAR si sia evoluto e adattato dalle soluzioni di tipo statico verso la fusione con sensori di posizionamento, affiancandosi sempre più a sistemi di mappatura mobile, detti Mobile Mapping Systems (MMSs) che equipaggiano corpi in movimento (automobili, droni, carrelli, operatori)[1]. Ciò è utile in un'ottica di migliorare continuativamente la sostenibilità del rilievo metrico, per poter dedicare maggiore tempo e coinvolgimento all'elaborazione e ottimizzazione dei dati nei modelli 3D successivi alla fase di acquisizione, avvantaggiando in tal modo il tempo impiegato in campagna per lo svolgimento del rilievo e a scapito ovviamente di vagliare la quantità e la selezione dei dati 3D in fase di lavoro sul campo. Perciò, il grande proposito della ricerca applicata alle nuove tecnologie della Geomatica, anche *low-cost*, è quello di testarne le potenzialità e definirne i limiti e condizioni di applicabilità, diffondendone il loro utilizzo nei diversi campi applicativi, e proponendo metodi avanzati e alternativi che trovino spazio e diffusione anche nelle condizioni operative effettive, nel caso per esempio delle emergenze, e soprattutto per un settore così spesso carente di risorse quale è quello del patrimonio architettonico. Tale studio sull'adozione di strumenti basati su MMSs portatili per il rilievo speditivo e la documentazione 3D di complessi architettonici in evidente stato di danno, si inserisce all'interno dell'esperienza del team DIRECT per la task force condotta nella basilica e convento di San Nicola a Tolentino (Figura 1) e si sviluppa a partire dalla sua attuale condizione di vulnerabilità e dalle tracce indelebili della sequenza sismica di Amatrice-Norcia-Visso dell'autunno 2016, in particolare sono evidenti i segni dell'evento del 30 ottobre.

2. Il complesso architettonico basilica e convento di San Nicola

Come spesso emerge, anche a Tolentino la condizione di vulnerabilità delle strutture – che si è chiaramente manifestata in seguito alle scosse del 30 ottobre 2016 – è ascrivibile alla eterogenea e progressiva serie storica di rimaneggiamenti, sopraelevazioni e ampliamenti del complesso conventuale.

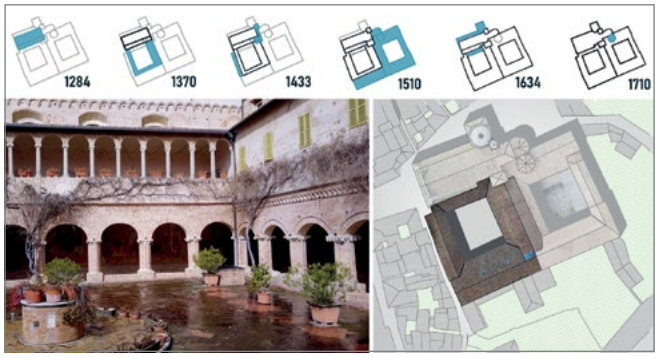


Figura 1. La cronologia della stratificazione storica degli interventi di edificazione del complesso basilicale. Una immagine del chiostro e la sua individuazione nella planimetria integrata con l'ortofoto da fotogrammetria UAV.

In particolare la struttura del chiostro trecentesco e il convento in muratura laterizia sono determinati da interventi di ampliamento e frazionamento degli spazi attuati a partire dalla metà del XV secolo con il cambio di congregazione religiosa: dagli Agostiniani, insediatisi dal 1250, ai religiosi lombardi arrivati intorno alla fine del XV secolo[2]. Infatti, a partire dal 1490 viene avviato un ampliamento del convento con un nuovo refettorio a sud e intorno al 1502 la congregazione vuole ristrutturare l'ala ovest con un corridoio distributivo aggiuntivo al primo piano, sopra il vecchio refettorio, per organizzare quante più celle possibile negli spazi del lato occidentale che già verso la metà del XV secolo avevano subito un ampliamento. L'episodio decisivo è da individuarsi con l'avanzare del XVII secolo, quando, con le attuazioni incisive delle operazioni di allargamento della basilica e l'aggiunta delle cappelle laterali alla navata verso sud, adiacente il chiostro, è subentrata la necessità di spostare l'ala settentrionale del portico addossata alla basilica, restringendo di una campata le due ali est e ovest del portico che si innestavano sull'asse della basilica. Hanno contribuito a gravare sulla solidità strutturale anche i tamponamenti della fine del XVII secolo delle facciate sud, est e ovest del chiostro prospicenti il portico impostato su tardogotici o precedenti pilastri mistilinei a sezione rilevante e tipici archi ribassati ancora oggi conservati[3].

3. Il sistema MMS Zeb Revo e valutazione delle nuvole presso il convento di Tolentino

Se da un lato il complesso della basilica, gli ambienti monumentali e il chiostro porticato con i loro ricchi apparati decorativi hanno visto il dispiegamento di tecnologie integrate ad alta risoluzione finalizzate alla documentazione del degrado e alla modellazione 3D per l'analisi e il monitoraggio strutturale[4], in questo report si è tracciata una via alternativa per quanto riguarda l'impatto delle tecnologie *low-cost*. La natura di queste ricerche è stata condotta sia sugli approcci *image-based* con l'uso di steady-camera compatta[5] per un approccio di tipo fotogrammetrico che sugli approcci *range-based*, sperimentando un sistema portatile manuale di scansione LiDAR continua basato sulla tecnologia SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*)[6].

Questa modalità è stata orientata a consentire la mappatura estensiva di tutte le volumetrie fuori terra e interrate e, in particolare gli ambienti porticati del chiostro e in particolare, i vani compatti e ripetitivi dei dormitori e degli ambienti comuni del convento al primo piano delle maniche sud e ovest che sono stati abbandonati dopo il sisma (Figura 2).

Le scansioni da MMS hanno riguardato l'intero complesso conventuale, la Basilica, la cripta e il chiostro (Figura 3).

Ciò che contraddistingue tipicamente i sistemi di mappatura mobile LiDAR è, molto sinteticamente, una coppia di requisiti caratterizzanti[7]:

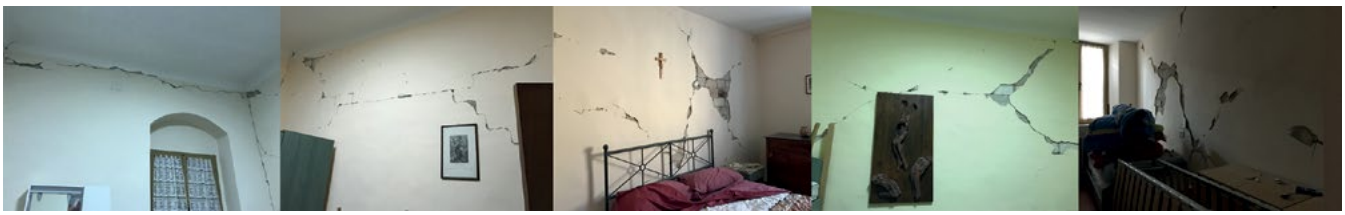


Figura 2. Alcuni scatti dei danni e fessurazioni dell'interno dei dormitori al primo piano.

- l'essere adatti a mappature di interni ed esterni perché dotati di un sistema di posizionamento multiplo basato su una fusione di sensori di misura (profilometri laser), di posizionamento satellitare in esterno (GNSS), e sensori inerziali e di orientamento in interno ed esterno (magnetometri, giroscopi, accelerometri) di aiuto alla stima del posizionamento della traiettoria. Gli algoritmi implementati, tra i quali lo SLAM, che regolano la corrispondenza tra i dati multi-sensore andranno poi a definire, della traiettoria da cui viene misurato il dato 3D, la velocità, la distanza, la posizione;
- il funzionamento tramite un'acquisizione di tipo continuo in movimento, detta *seamless*, cioè la capacità, durante il moto ininterrotto della piattaforma, di acquisire in tempo reale il dato metrico e quelli di posizionamento e orientamento in maniera continua e simultanea, andando progressivamente a costruire il dato 3D sotto forma di nuvola di punti.

In particolare l'algoritmo SLAM implementato nella tecnologia Zeb Revo utilizzata, è basato sulla capacità di stimare la posizione progressiva della traiettoria dello strumento $[T(\tau)]$ funzione del tempo, grazie a una sequenza di traslazioni $t(\tau)$ e rotazioni(τ) registrate e assistite dal sensore inerziale IMU durante l'avanzare dell'operatore, grazie soprattutto all'identificazione di caratteristiche geometriche dell'ambiente. Infatti l'algoritmo è in grado di avanzare nella misura dei profili successivi in base alla somiglianza e relativo allineamento dei nuovi profili su quelli precedenti che sono andati a creare progressivamente un modello 3D, il quale alla fine verrà ottimizzato in chiusura del percorso.

È evidente come le potenzialità di questi sistemi di MMS si possono rintracciare soprattutto nella mappatura degli ambienti interni dove la capacità di posizionamento comunemente svolta dai ricevitori GNSS è assente. Significativa è soprattutto la capacità di questi sistemi (es: Hokuyo per Zeb di GeoSLAM, Velodyne per Stencil Kaarta, Viametris i-MMS, Leica Pegasus) di offrire una competitività eccellente in termini di tempo a fronte di una risposta metrica adeguata generalmente alla scala 1:100. Questo riguarda sia l'accuratezza dei modelli che, da studi condotti in proposito negli ultimi anni, si attesta ormai intorno ai 2-3 centimetri[8] nelle condizioni interne, ma anche la digitalizzazione con un discreto grado di dettaglio dei particolari a grande scala[9]. Piuttosto avanzata è anche la ricerca che vede nell'impiego di questi sistemi di mappatura un utile strumento per derivare in maniera quanto più possibile automatica le ricostruzioni 3D continue degli ambienti percorsi tramite approcci parametrici e anche contenuti semantici negli oggetti riconosciuti[10]. Recenti indagini applicate a complessi del patrimonio costruito stanno dimostrando che questi sistemi sono promettenti anche in ambienti complessi come gli interrati[11] e le strutture verticali, oltreché spazi angusti e articolati, o conservati in stato di rovine[12].

Per le strutture del chiostro e convento del complesso di San Nicola il sistema Zeb Revo è stato accompagnato da un modello a scansione laser di tipo statico come verifica metrica di accuratezza e un modello fotogrammetrico da UAV per il completamento delle porzioni verticali delle coperture (Figura 4).

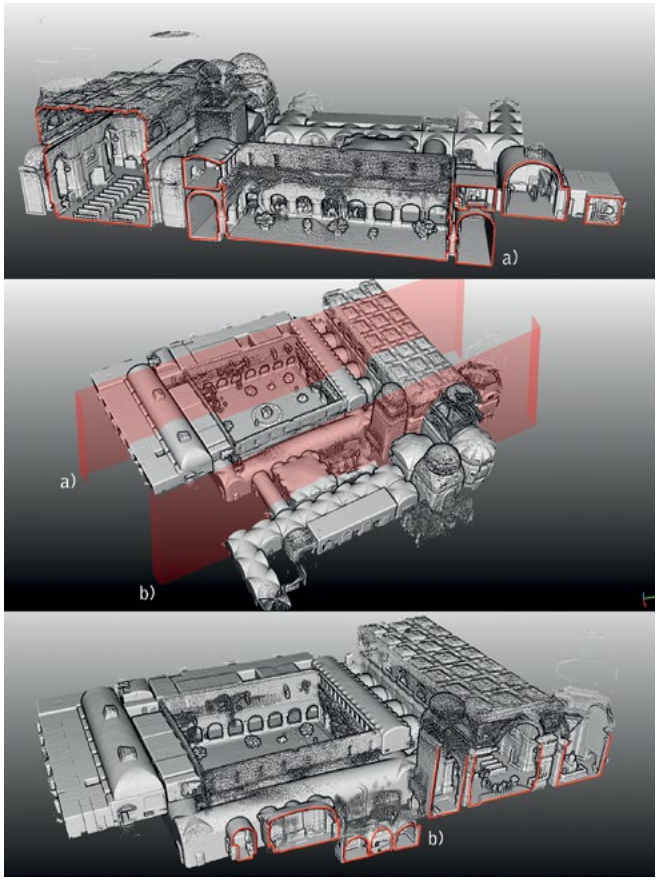


Figura 3. L'integrazione complessiva delle nuvole 3D derivate dal MMS Zeb REVO di GeoSLAM per la volumetria completa dell'area del complesso. Due sezioni che attraversano (a) chiostro, convento e basilica, (b) sacrestia e cripta.

Figura 4. I tre sistemi testati: laser scanner Faro Focus 3D, Zeb Revo di GeoSLAM e fotogrammetria UAV con il Phantom 4 DJI.

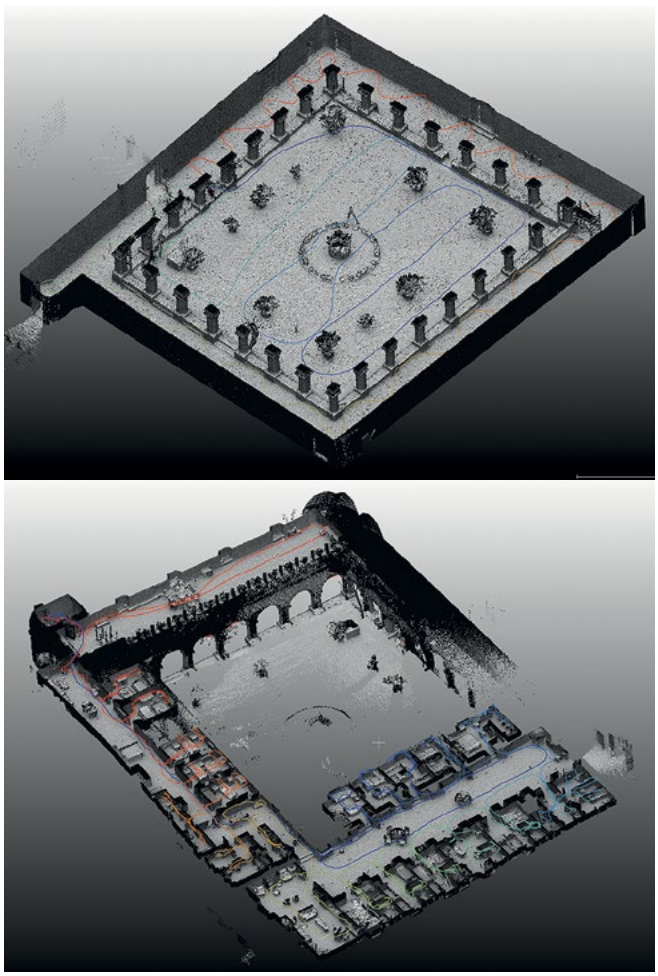


Figura 5. Le due scansioni di mapping mobile che hanno coperto gli spazi del chiostro e del convento al piano superiore.

I percorsi di MMS eseguiti sono stati due (Figura 5) e hanno coperto l'area del chiostro e degli ambienti del primo piano: l'acquisizione è durata circa 20 minuti a scansione, percorrendo la traiettoria a una velocità di circa 1m/sec. Il numero totale di punti acquisiti è stato circa 30 milioni.
Il post-processamento delle nuvole e la loro pulizia e segmentazione hanno permesso di allineare le scansioni nel sistema di riferimento globale del rilievo tramite l'appoggio della nuvola da LiDAR statico e di andare a correggere eventuali errori di deriva verticale e orizzontale degli ambienti più lontani della manica sud, problema di cui il sistema di mapping talvolta soffre a causa della lunghezza del percorso. Dalla densità del dato metrico e dalla sua verificata continuità e accuratezza è stato possibile estrarre dei prodotti muli-scala: un modello 3D e degli elaborati 2D multi-scala di tipo tradizionale, derivati però dagli ortopiani di sezione delle nuvole ZEB integrate con la nuvola UAV. Una prima planimetria generale di ricognizione è stata digitalizzata in vettoriale alla scala 1:200 (Figura 6) mentre gli elaborati architettonici dettagliati sono proposti alla scala 1:100 (Figura 7).

Considerazioni conclusive

L'eccezionale rapidità e portabilità di questo tipo di tecnologie SLAM si preannuncia sicuramente dirompente nell'offrirsi alle attività degli esperti di rilievo 3D e documentazione del patrimonio costruito. I sistemi sono tutt'ora in una fase di ricerca e sviluppo ma i primi prodotti commerciali che si stanno presentando sul mercato sono molto concorrenziali rispetto ai sistemi di scansione statica di tipo più consolidato, benché differenti per natura e per qualità del dato.
Il rilievo di tipo edilizio-speditivo potrà certamente beneficiare di queste soluzioni tecnologiche da sensori integrati, e gli sviluppi stanno andando, tra gli altri, verso l'integrazione del contenuto informativo radiometrico, derivato cioè dalle immagini, molto vantaggioso per la lettura di questi modelli leggeri e maneggevoli[13]. Tale opportunità, si rivela del tutto preminente in casi come quello qui presentato dove la lettura del danno e l'analisi del rischio degli edifici passa attraverso la misura ed il posizionamento nello spazio sia di consistenze murarie, oltre che la documentazione fotografica di fenomeni quali le estese fessurazioni e crolli localizzati.

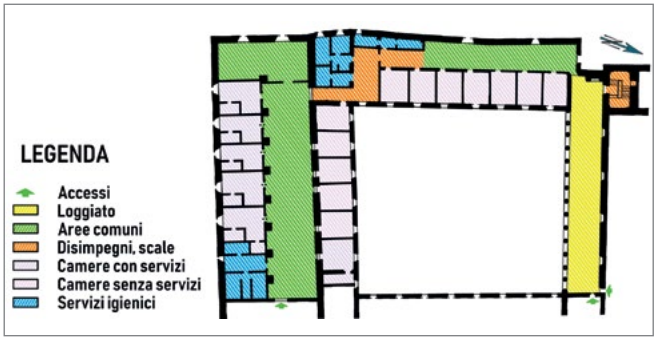


Figura 6. Planimetria generale del piano del dormitorio del convento estratta con dettaglio assimilabile alla scala 1:200.

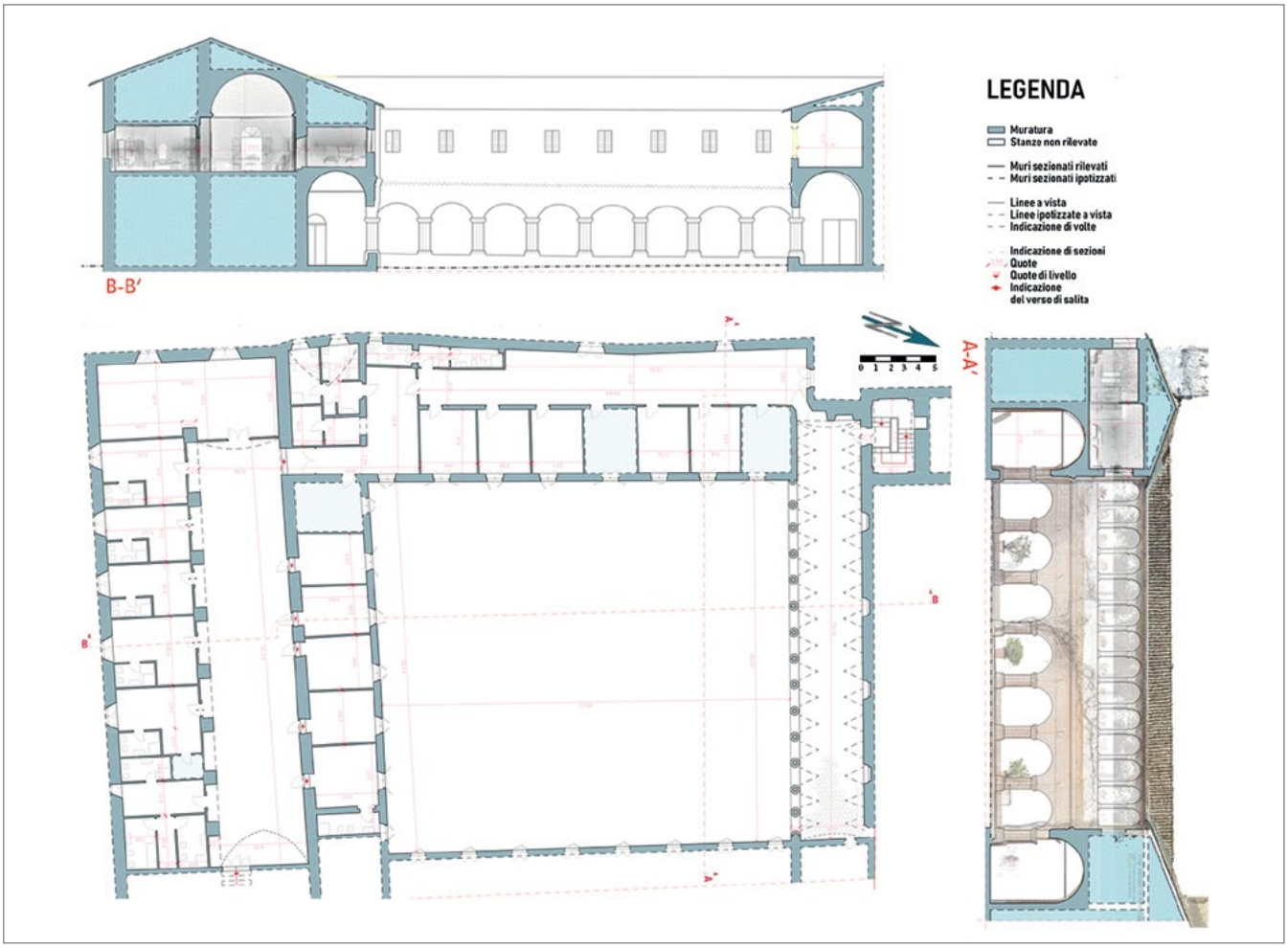


Figura 7. Elaborati architettonici in scala 1:100 derivati dalle sezioni delle nuvole ZEB integrate alle nuvole fotogrammetriche UAV.

Note

[1] Iván Puente, Higinio González-Jorge, Joaquín Martínez-Sánchez, Pedro Arias, *Review of mobile mapping and surveying technologies*, in «Measurement», 46 (7), 2013, pp. 2127-2145.

[2] Pio Francesco Pistilli, *Architettura medievale del complesso monumentale*, in Centro Studi Agostino Trapè (a cura di), *La Basilica di San Nicola a Tolentino. Guida all'arte e alla storia*, Biblioteca Egidiana, Tolentino 1995.

[3] Pio Francesco Pistilli, *Architettura medievale*... cit.

[4] Cfr. in questo volume il contributo a p. 102 e anche: Daniele Costanzo, Filiberto Chiabrando, Renato Lancellotta, Andrea Maria Lingua, Antonino Quattrone, Donato Sabia, Antonia Spanò, *Rilievo 3D e monitoraggio strutturale per l'analisi post-sisma del complesso di S. Nicola a Tolentino (MC)*, in Atti della XXI Conferenza Nazionale ASITA, 21-23 novembre 2017, Salerno, pp. 315-323.

[5] Alessio Calantropio, Giacomo Patrucco, Giulia Sammartano, Lorenzo Teppati Losè, *Low-cost sensors for rapid mapping of cultural heritage: first tests using a COTS Steadicamera*, in «Applied Geomatics», 1-10, 2017.

[6] Questi temi, già affrontati nel Laboratorio di Geomatica per i beni culturali del DAD, sono stati approfonditi, per il complesso di Tolentino in Alice Accornero, *Il rilievo sostenibile per il patrimonio edilizio a rischio: mobile mapping basato su tecnologia SLAM*, tesi di laurea in Architettura per il progetto sostenibile, Politecnico di Torino, relatori Antonia Spanò, Giulia Sammartano, a.a. 2017-2018.

[7] Ivan Puente *et al.*, *Review*..., cit.

[8] Charles Thomson, George Apostolopoulos, Damian Backes, Jan Boehm, *Mobile Laser Scanning for Indoor Modelling*, in «ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», II-5/W2, 2013, pp. 289-293.

[9] Charles Thomson *et al.*, *Mobile Laser Scanning*..., cit., p. 293.

[10] Lucía Díaz-Vilariño, Edward Verbree, Sisi Zlatanova, Abdoulaye Diakité, *Indoor modelling from SLAM-based laser scanner: door detection to envelope reconstruction*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W7, 2017, pp. 345-352.

[11] Andrea di Filippo, Luis Javier Sánchez-Aparicio, Salvatore Barba, José Antonio Martín-Jiménez, Rocío Mora, Diego González Aguilera, *Use of a Wearable Mobile Laser System in Seamless Indoor 3D Mapping of a Complex Historical Site*, in «Remote Sensing», 10(12), 2018, p. 1897.

[12] Giulia Sammartano, Antonia Spanò, *Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition*, in «Applied Geomatics», 10 (4), 2018, pp. 317-339.

[13] Giulia Sammartano, Antonia Spanò, Lorenzo Teppati Losè, *A fusion-based workflow for turning SLAM point clouds and fisheye data into texture-enhanced 3D models*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W17, 2019, pp. 295-302, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-295-2019.

BY-NC-SA

Ortofoto e modelli 3D ad alta risoluzione per la valutazione del degrado di murature affrescate. Il Cappellone della basilica di San Nicola a Tolentino

High resolution orthophotos and 3D models for health evaluation of frescoed masonries. The Cappellone in the San Nicola basilica in Tolentino

STEFANO PERRI, NANNINA SPANÒ

Nannina Spanò, professore associato di Geomatica, Politecnico di Torino, DAD
antonia.spano@polito.it

Stefano Perri, laureato magistrale in Architettura per progetto sostenibile, Politecnico di Torino, DAD
stefano.perri@polito.it

Abstract
I modelli bidimensionali e 3D derivati dalle innovazioni e dalle integrazioni delle tecnologie geomatiche *image based* o *range based* hanno dimostrato negli ultimi anni di aver sviluppato in modo notevole le capacità di descrivere i beni culturali, rendendo più rapide e sostenibili le fasi di acquisizione, più ricche e approfondite quelle di rappresentazione e analisi fino a poter contribuire in modo significativo le indagini che riguardano ad esempio le anomalie dell'architettura storica, potendo descrivere in modo accurato alterazioni dei sistemi costruttivi e dei materiali.
Il contributo presenta un'applicazione conseguente il rilievo metrico 3D del Cappellone del complesso conventuale della basilica di San Nicola a Tolentino, nell'ambito delle attività di studio della task force del Politecnico di Torino nelle aree del terremoto del Centro Italia, a partire dalle acquisizioni eseguite dal team DIRECT nel febbraio del 2017.

The two-dimensional and 3D models derived from the innovations and integrations of image based or range based geomatics technologies have demonstrated in recent years that they have significantly developed the ability to describe cultural heritage. Such techniques make the acquisition phases faster and more sustainable, more rich and in-depth those of representation and analysis up to being able to contribute significantly to the investigations concerning, for example, the anomalies of historical architecture, being able to accurately describe alterations of construction systems and materials.
The contribution presents an application resulting from the 3D metric survey of the Cappellone of the convent complex of the basilica of San Nicola in Tolentino, as part of the study activities of the task force of the Politecnico di Torino in the areas of the earthquake in Central Italy, starting from the acquisitions made by the DIRECT team in February 2017.

1. Tecniche integrate basate su immagini e su scansioni laser per la documentazione del patrimonio costruito

Tra le innovazioni tecnologiche e gli sviluppi metodologici che hanno riguardato le tecniche di indagine che concorrono alla conoscenza materica e tematica del patrimonio costruito e che quindi contribuiscono in modo trasversale alla matrice interdisciplinare della conservazione, le tecniche del cosiddetto *3D recording* ricoprono una posizione rilevante.

I metodi laser scanning e quelli basati su immagini, cioè legati alla fotogrammetria digitale che ha efficacemente integrato le tecniche di *dense matching* di immagini e la tecnologia *Structure from Motion* (SfM) messi a punto nell'ambito della *computer vision*, offrono oltre al tradizionale valore metrico dei prodotti fotogrammetrici, anche elevate produttività e tempi rapidi per via delle modalità semiautomatiche introdotte nel *workflow*; le continue recenti innovazioni hanno potuto sviluppare maggiori capacità descrittive, sia in riferimento alla sfera morfologica e dimensionale dei manufatti[1], sia nella caratterizzazione materica e inerente il complesso delle alterazioni delle fabbriche[2].
La tecnologia laser scanning è tuttora quella che garantisce i più elevati livelli di dettaglio e accuratezze e per questo motivo generalmente preferita per le valutazioni strutturali[3], non essendo inoltre influenzata da parametri ambientali come la luce. Dal momento però che attualmente non sono integrate camere ad alta risoluzione nella medesima strumentazione, la fusione delle nuvole di punti e il valore dell'alta risoluzione di immagini RGB avviene in processi di integrazione e fusione nelle fasi di elaborazione.
Se possibile, più rilevanti degli aspetti tecnici sono le esigenze da soddisfare; quando le superfici da documentare siano rappresentate da murature storiche affrescate, come il presente caso del Cappellone della basilica di Tolentino, e quindi il dettaglio, la cromia, i valori stilistici e il possibile degrado siano gli elementi da analizzare attentamente nei conseguenti prodotti, il metodo fotogrammetrico e le ortoproiezioni di fotogrammi orientati che possono facilmente garantire dimensioni del pixel pari a 1mm, sono di gran lunga le più consigliabili e preferite[4].

2. Il Cappellone e le relazioni spaziali con il contesto

La posizione del Cappellone è nell'ala orientale del convento, l'unica edificata agli inizi del XIV secolo. La prima funzione fu quella di sacrestia, e solo nel terzo decennio del Trecento iniziò la trasformazione in cappella memoriale di San Nicola, con l'inserimento nobilitante e conforme ai canoni dell'ordine mendicante della volta ogivale quadripartita[5].
Il Cappellone è riferito come il luogo di maggior interesse dell'intero complesso della basilica tolentinate, per la decorazione pittorica della sala, tra le più estese e meglio conservate dell'inizio del Trecento in Italia, realizzata da maestranze dirette dal pittore Pietro da Rimini, si pensa subito dopo la canonizzazione del santo, che avvenne nel 1325[6].

Figura 1. Due fotogrammi ritraggono la volta e una parete affrescata (la più danneggiata) che riportano cicli della vita del santo, di Gesù e altri repertori storico-religiosi.

Al centro di questo spazio si trova l'Arca lapidea e la statua policroma di San Nicola, realizzata per per deporvi le spoglie del Santo, ma che in realtà mai le ospitarono. I valori che distinguono questo ambiente e gli studi che hanno evidenziato l'appartenenza di questa sala alla prima fase agostiniana del convento e il suo ruolo chiave nel corso delle trasformazioni trecentesche e del secolo successivo, hanno sin dal principio direzionato la pianificazione del rilievo 3D del team DIRECT nella primavera del 2017.
La rete topografica è stata pianificata per restituire in un unico sistema di riferimento il modello aereo dell'intero complesso, della basilica, del chiostro, della parte di convento destinata all'accoglienza e appunto del Cappellone, come riferito nel contributo esteso in questo volume dedicato alle attività interdisciplinari realizzate sulla basilica (Figura 9, p. 107).
La determinazione della rete topografica principale, che distribuisce una serie di vertici all'esterno del complesso e nel chiostro è stata determinata con tecnica GNSS (*Global Navigation Satellite System*), mentre una poligonale vincolata agli estremi determinata mediante stazione totale distribuisce vertici topografici di coordinate note negli interni, compreso il cappellone.
L'unicità del sistema di riferimento, oltre a determinare la georeferenziazione di ogni parte del rilievo, consente la possibilità di mettere in relazione dimensionale e spaziale i diversi ambienti e i singoli elementi architettonici della fabbrica, e spesso consente di supportare e fornire elementi di valutazione ulteriore alla generale interpretazione delle fasi costruttive e stratificazioni diacroniche delle componenti dell'edificazione[7].
Nel caso del Cappellone, la sezione trasversale del complesso, riportata in Figura 2, rappresenta efficacemente la scelta trecentesca di interrompere gli ambienti di abitazione degli spazi conventuali al piano superiore, per fornire sviluppo verticale alla sala che si estende con la grandiosa volta costolonata in doppia altezza rispetto agli ambienti limitrofi[8].

3. Elaborazione delle ortofoto e del modello 3D

Il rilievo 3D del Cappellone è stato pianificato per consentire di valutare lo stato di salute delle murature e della volta, per chiarire se soprattutto quest'ultima presentasse anomalie di forma e se queste fossero eventualmente ascrivibili ai fenomeni sismici che in altre zone del complesso hanno causato evidenti danni strutturali. Soprattutto, si è colta occasione per prevedere di documentare lo stato di conservazione superficiale degli affreschi, quantificando il degrado tramite una attenta restituzione da ortofoto.
Per questi motivi innanzitutto si è prevista un'opportuna illuminazione artificiale dell'interno, per consentire la massima qualità delle immagini acquisite, che sono state scattate con camera Nikon D800E (obiettivo Nikon 24 mm, dimensione pixel 4.89 mm, dimensioni del fotogramma 4912x7360 px, per un totale di 36 Mp) montata su treppiede e azionata in remoto, con riprese registrate con asse della camera orizzontale, nadirale e con inclinazione di 45° verso le superfici del manufatto, al fine di massimizzare la sovrapposizione stereoscopica (*overlapping*).
Delle 142 immagini originalmente acquisite e fatte oggetto di una preliminare ottimizzazione radiometrica, solo 102 hanno passato il vaglio e sono state impiegate per le elaborazioni fotogrammetriche; inoltre sono stati acquisiti 52 punti di controllo distribuiti tra volta e pareti, rigorosamente senza l'uso dei consueti marker e sfruttando pienamente quindi la potenzialità "senza contatto" prevista dal metodo.
I risultati della prima fase di *dense matching* di immagini sono stati sorprendenti, dal momento che la nuvola rada dei *tie-point* è stata calcolata con un totale di più di un milione di punti. L'ottimizzazione della stima dei centri di presa conseguita con il *bundle adjustment* successivo con l'uso dei punti di controllo topografici ha consentito di generare una nuvola di punti che conta addirittura 98 milioni di punti, caratterizzata da una accuratezza metrica stimata con un valore medio dello scarto quadratico medio sui punti di controllo pari 1,4 mm. (GSD – dimensione de pixel pari a 1,3 mm).

4. Valutazione dei risultati e analisi delle murature

La prima valutazione della nuvola densa generata, e soprattutto la sua trasformazione in superficie triangolata (*mesh*), ha consentito di stimare l'elevata qualità del risultato; la Figura 3c mostra come la superficie continua denunci la presenza

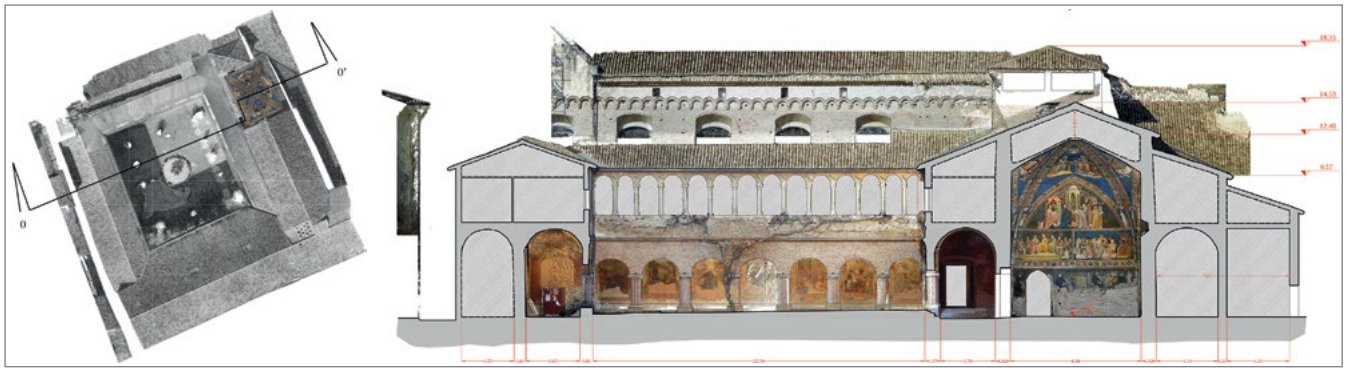


Figura 2. Sezione architettonica trasversale del chiostro, con modello volumetrico della manica orientale che ospita il Cappellone (integrazione di viste delle nuvole di punti e ortofoto, nella sezione vettoriale dei corpi di fabbrica).

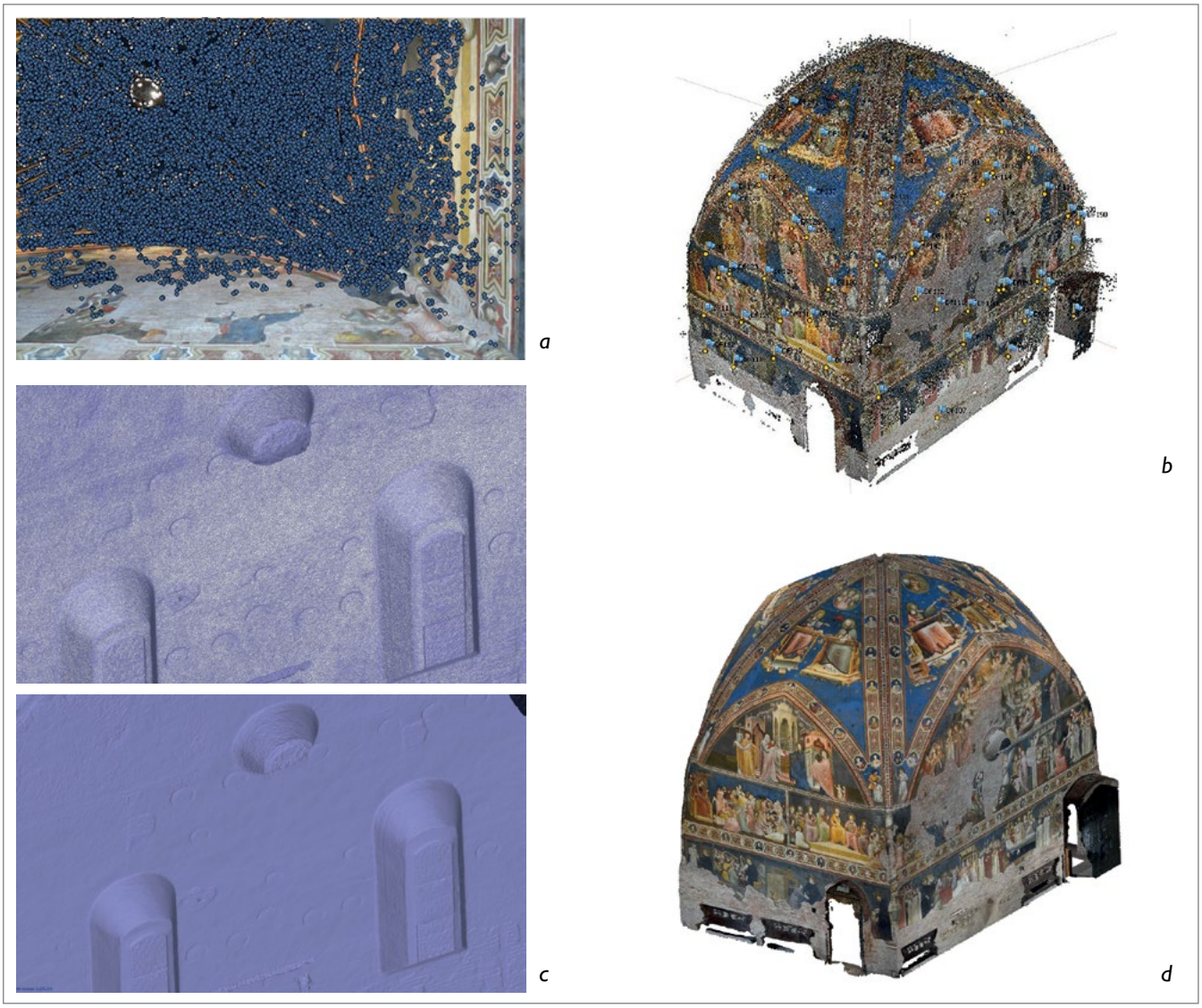


Figura 3. Elaborazioni fotogrammetriche con tecnica SfM: (a) densità dei tie points in una porzione della nuvola sparsa; (b) distribuzione dei punti di controllo collimati (c) confronto tra superficie triangolata visualizzata in wireframe e come solido (d) modello 3D con texture.

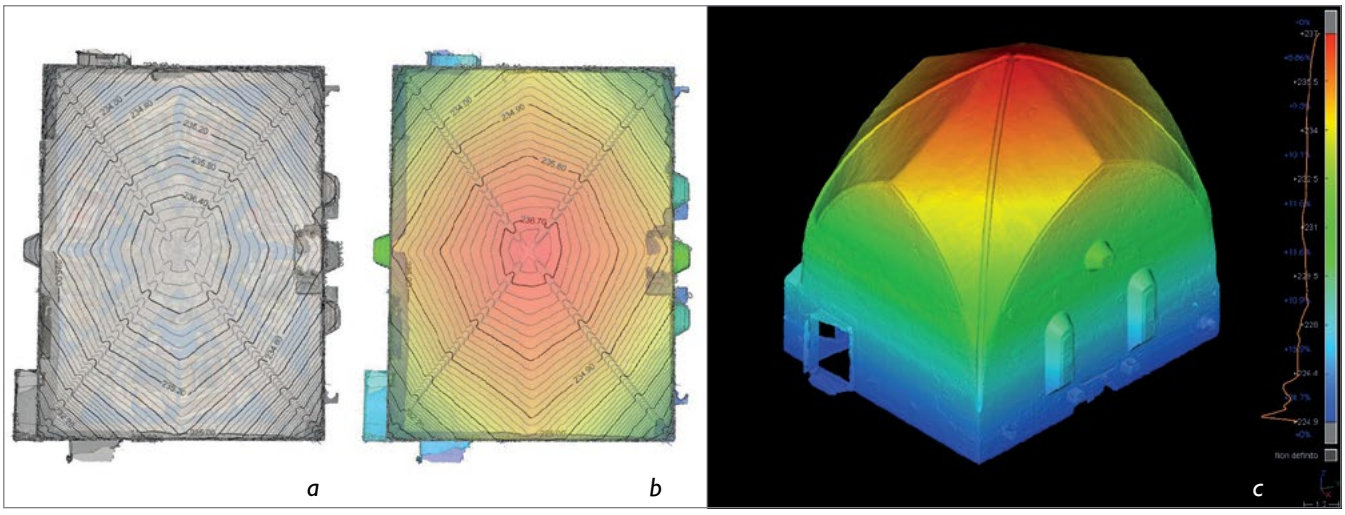


Figura 4.Analisi del DEM ed estrazione di curve isoipse per valutare la geometria ed eventuali variazioni di forma della volta costolonata; (a) sovrapposizione delle curve isoipse (equidistanza 90 cm) all'ortofoto; (b) sovrapposizione di isoipse con DEM, (c) calcolo del DEM sull'intero modello della sala.

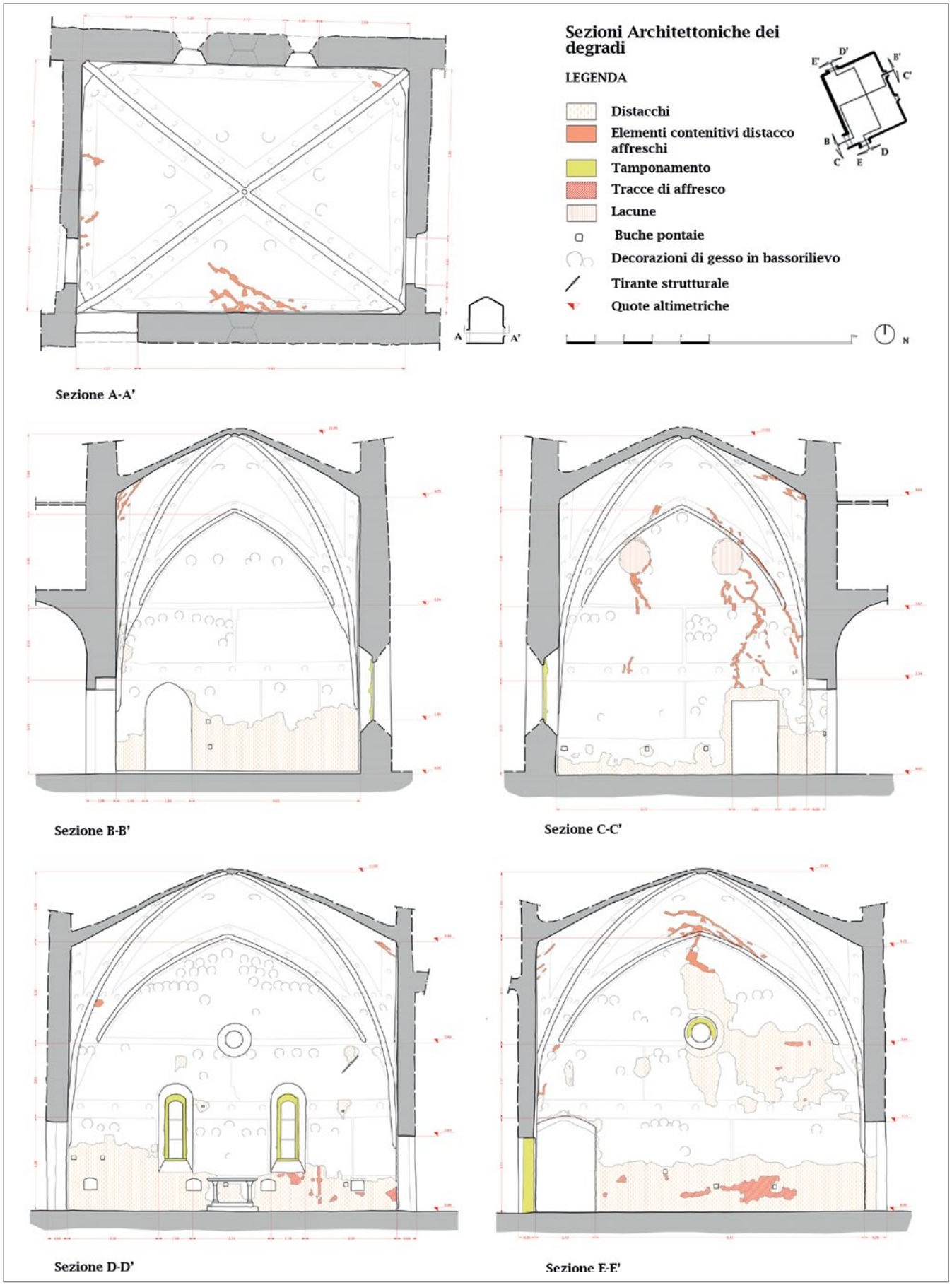


Figura 5. Restituzione della proiezione della volta e prospetti delle pareti con identificazione degli elementi tecnologici e di degrado.

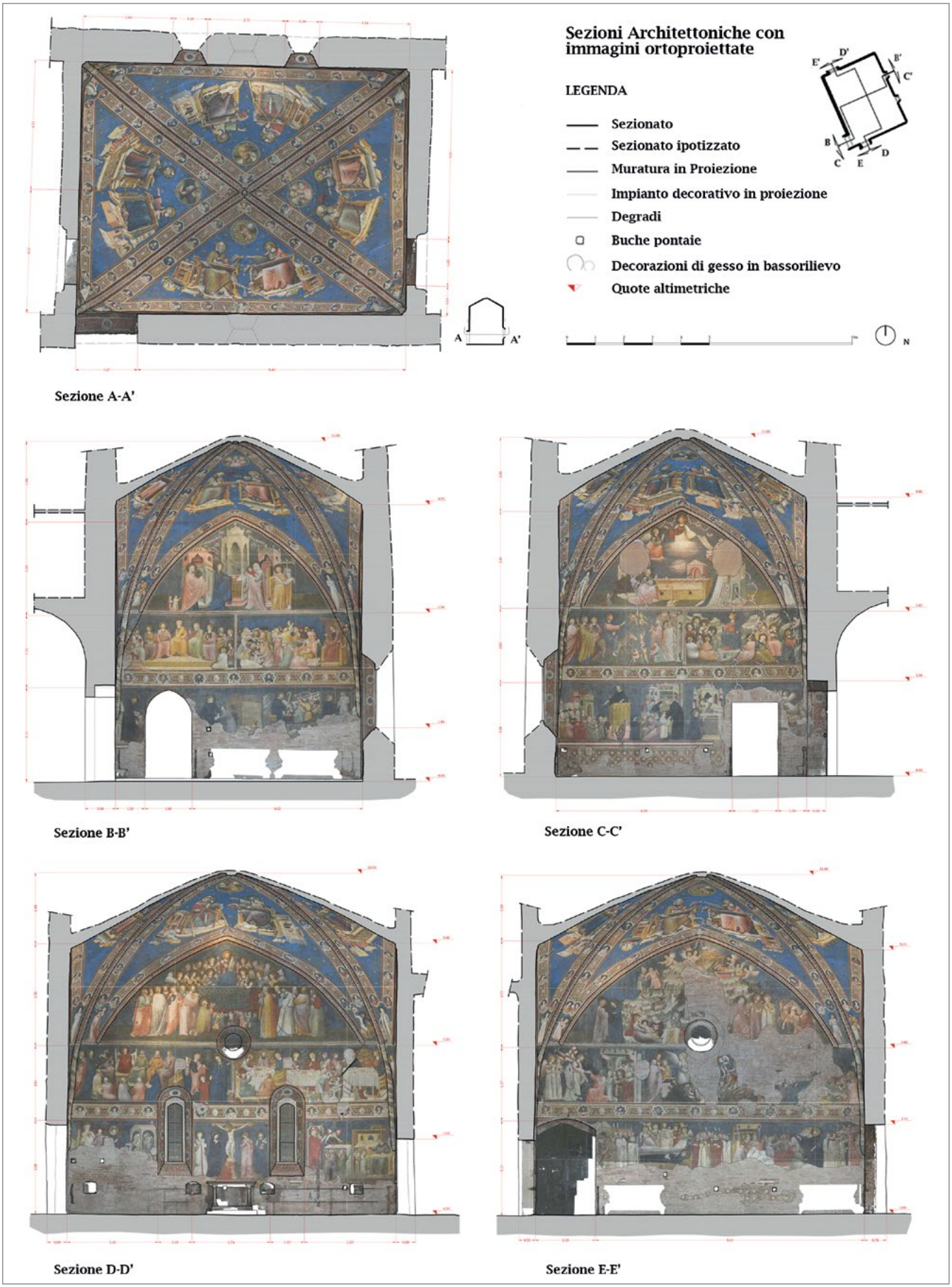


Figura 6. Elaborati architettonici della sala del Cappellone (proiezione della volta a direttrici ogivali e prospetti delle pareti della sala). Restituzione vettoriale con integrazione delle ortofoto calcolate con una dimensione del pixel pari a 1 mm.

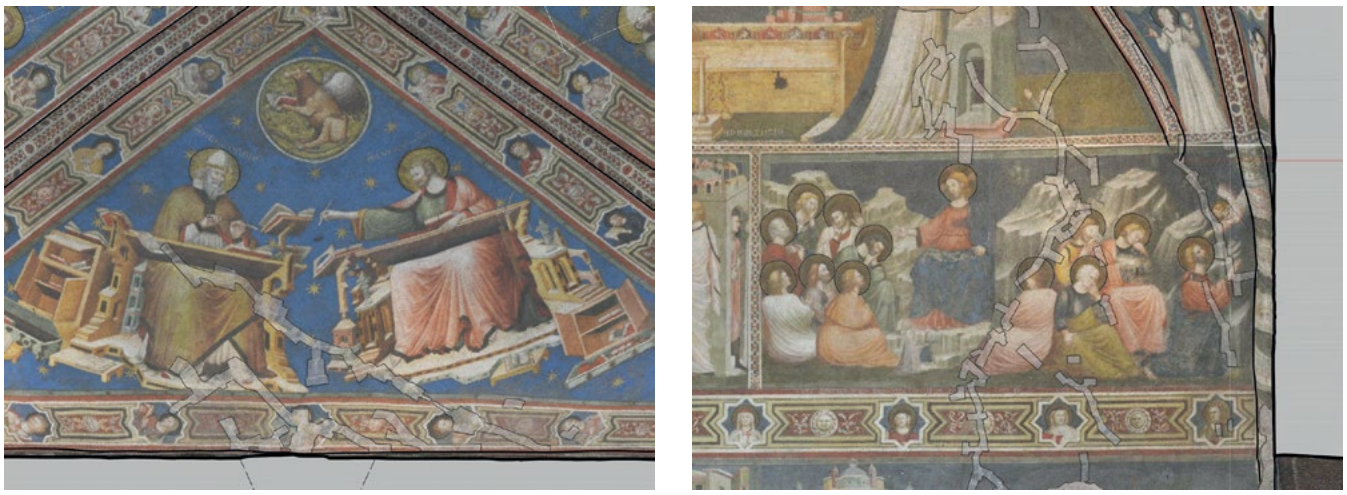


Figura 7. Particolari delle ortofoto della volta e della parete sud-est, che mostrano l'applicazione di nastri protettivi sulle fessurazioni.

dell'enfatizzazione delle aureole di tutte le figure affrescate tramite stucco a rilievo, particolare che non era visibile a occhio nudo, data anche la scarsa illuminazione della sala.
L'estrazione di ortofoto ad alta risoluzione (1 mm per pixel), costituite da mosaici di fotogrammi ortoproiettati sui piani medi delle pareti della sala ha consentito la restituzione completa degli elaborati architettonici in proiezioni ortogonali, anche della proiezione della volta dal basso verso l'alto (Figura 6), consentendo inoltre la precisa descrizione di elementi tecnologici e del degrado (distacchi, elementi di contenimento del distacco posizionati in recenti attività di restauro, tamponamenti, lacune degli affreschi, buche pontaie, rilievi a stucco delle aureole dei santi) (Figura 5).
Un volta ottenuto il modello 3D, sotto forma di nuvola di punti o di modello di superficie continuo, con evidenziazione dei caratteri di rugosità o *smoothness* della superficie, ancorché con l'ulteriore proiezione controllata dal punto di vista metrico delle immagini orientate, può ulteriormente essere analizzato derivando il DEM (*Digital Elevation Model*) che permette di esaminare in dettaglio, tramite un *range* di colori, il valore delle quote dei punti rispetto ad un piano di riferimento, che per l'analisi della volta è ovviamente orizzontale. L'analisi del DEM e l'ulteriore analisi tramite l'estrazione di isoipse (Figura 4) consente di valutare che la struttura non presenta anomalie morfologiche e sicuramente la geometria di progetto è conservata, dal momento che le curve isoipse (equidistanza 90 cm) dimostrano un andamento del tutto regolare.

5. Valutazioni conclusive

Gli elaborati grafici architettonici che integrano le ortofoto e l'esame del modello 3D, nelle diverse configurazioni, hanno consentito di mettere in luce le caratteristiche geometriche e spaziali della sala anche in relazione al contesto costruito, permettendo inoltre un approfondimento degli elementi principali del degrado materico delle superfici affrescate.
È stato possibile identificare due importanti categorie di degrado: il deterioramento delle superfici affrescate tipicamente dovuto al tempo, per esempio la risalita capillare dell'umidità dal terreno e, un secondo da ascrivere al sisma del 2016. Il primo degrado ha condotto al distacco continuo dello strato superficiale di finitura a ridosso del pavimento e delle aperture, con la conseguente esposizione dei laterizi della muratura, la riduzione della malta tra le fughe, la presenza a tratti di patina biologica scura ed efflorescenze saline. Altri degradi dovuti al tempo sono lacune di superficie affrescata, sia sulle pareti (come si nota sulla parete S-E) sia sulle superfici ogivali della volta. Per completezza sono stati segnalati gli interventi di restauro degli intonaci, in prossimità delle finestre circolari e delle monofore, e i segni di rimaneggiamenti agli infissi, o adeguamenti dopo il distacco degli intonaci.
Per quanto riguarda le conseguenze dovute al sisma e i danni portati alle pitture murarie, si può asserire si siano formate svariate micro-crepe, in alcuni casi distribuite sulla quasi totalità delle pareti, che quindi rendono più complesso il quadro degli interventi necessari, e che si aggiungono alle fessurazioni già riscontrate e trattate con nastri da restauro in carta per contenere il loro propagarsi (Figura 7).
Dal momento che l'analisi dei modelli 3D – come già chiarito[9] – non hanno evidenziato sofferenze strutturali, si può concludere che è sicuramente l'apparato decorativo murario e i mirabili affreschi che mostrano i segni della loro fragilità, che, in caso di terremoto, dimostrano purtroppo l'estrema vulnerabilità.
Oltre alla valutazione dello stato di conservazione, un possibile impiego dei modelli digitali 2D e 3D ottenuti è sicuramente la possibilità di impiego come mezzo di diffusione della conoscenza, considerato che il luogo risulta momentaneamente inaccessibile; gli stessi modelli o un loro impiego ulteriore in progetti di comunicazione virtuale potranno supportare la descrizione della sala anche quando sarà possibile ristabilirne la piena e sicura fruibilità.

Note

[1] Alcuni riferimenti bibliografici: Josè Luis Lerma, Santiago Navarro, Miriam Cabrelles, Ana Elena Seguí, Naif Haddad, Talal Akasheh, *Integration of laser scanning and imagery for photorealistic 3D architectural documentation*, in Chau-Chang Wang (a cura di), *Laser Scanning, Theory and Applications*, InTech, 2011; DOI: 10.5772/14534. Athanasios Voulodimos, Nikolaos Doulamis, Dieter Fritsch, Michael Klein, Konstantinos Makantasis, Anastasios Doulamis, *Four-dimensional reconstruction of cultural heritage sites based on photogrammetry and clustering*, in «Journal of Electronic Imaging», 26(1):011013, 2016; DOI: 10.1117/1.JEI.26.1.011013. Fabrizio Apollonio, Marco Gaiani, W. Basilissi, Laura Rivaroli, *Photogrammetry driven tools to support the restoration of open-air bronze surfaces of sculptures: an integrated solution starting from the experience of the Neptune Fountain in Bologna*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W3, 2017, pp. 47-54; DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-47-2017.

[2] Cfr. in questo volume il contributo a p. 147. Ed anche: Fabio Radicioni, Pietro Matracchi, Raffaella Brigante, Andrea Brozzi, Manuela Cecconi, Aurelio Stoppini, Grazia Tosi, *The Tempio della Consolazione in Todi: integrated geomatic techniques for a monument description including structural damage evolution in time*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-5/W1, 2017, pp. 433-440, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-433-2017. Antonia Spanò, Filiberto Chiabrando, Elisabetta Donadio, Giulia Sammartano, *Tecnologia laser scanning per la valutazione statica delle strutture storiche*, in «Geomedia», 4, 2016.

[3] Giovanni Castellazzi, Antonio D'Altri, Gabriele Bitelli, Ilenia Selvaggi, Alessandro Lambertini, *From laser scanning to finite element analysis of complex buildings by using a semi-automatic procedure*, in «Sensors», 15, 8, 2015, pp. 18360-80; DOI: dx.doi.org/10.3390/s150818360.

[4] Marco Giorgio Bevilacqua, Gabriella Caroti, Isabel Martínez-Espejo Zaragoza, Andrea Piemonte, *Frescoed Vaults: Accuracy Controlled Simplified Methodology for Planar Development of Three-Dimensional Textured Models*, in «Remote Sensing», 8, 2016, p. 239. Giulia Sammartano, Antonia Spanò, *High scale 3d modelling and orthophoto of curved masonries for a multipurpose representation, analysisand assessment*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 42, 5W1, 2017, pp. 245-252; DOI: 10.5194/isprs-Archives-XLII-5-W1-245-2017.

[5] Pio Francesco Pistilli, *Architettura medioevale del complesso monumentale*, in Centro Studi Agostino Trapè (a cura di), *La Basilica di San Nicola a Tolentino. Guida all'arte e alla storia*, Biblioteca Egidiana, Tolentino, 1995, p. 33.

[6] Pio Francesco Pistilli, *Architettura del Cappellone*, in Centro Studi Agostino Trapè (a cura di), *La Basilica*... cit., p. 82.

[7] Silvia Beltramo, Elisabetta Donadio, Antonia Spanò, *Stratigraphic Analyses, Historical Evidences, and 3D Documentation Tools: Deepening Built Heritage – New Researches for Historical Building Sites in Staffarda*, in Carlo Inglese, Alfonso Ippolito (a cura di), *Analysis, Conservation, and Restoration of Tangible and Intangible Cultural Heritage*, IGI Global, 2019, pp. 273-301; DOI: 10.4018/978-1-5225-6936-7.ch012.

[8] Gli elaborati complessivi del rilievo UAV e laser scanning della basilica e del chiostro sono frutto della campagna di misure del Team DIRECT nell'ambito della task force del Politecnico. Tutti gli elaborati del presente contributo sono stati parte della tesi di Stefano Perri, *Metodi di Rilievo metrico 3D multiscala per il patrimonio costruito. Applicazioni aeree e terrestri in differenti scenari*, tesi di laurea in Architettura per il progetto sostenibile, Politecnico di Torino, relatori Antonia Spanò, Filiberto Chiabrando, luglio 2018.

[9] Cfr. in questo volume il contributo a p. 102.

BY-NC-SA

Esperienze didattiche e approfondimenti sui temi dell'HBIM e della realtà virtuale

Didactic experiences and insights on the topics of HBIM and Virtual Reality

CARLA BORRIELLO, RAFFAELLA STANO, NANNINA SPANÒ, FILIBERTO CHIABRANDO, ANDREA LINGUA

Abstract

Questo contributo ha il ruolo di riferire di una interessante esperienza didattica e di altre due attività di studio svolte nell'ambito di tesi di laurea, ciascuna originata dallo stage didattico realizzato dal team studentesco DIRECT del Politecnico di Torino a Tolentino, finalizzato al rilievo 3D del complesso conventuale.

La prima esperienza è legata al workshop di "Fotogrammetria digitale e scansioni 3D per il rilievo di beni culturali" (a.a. 2016-17), coordinato da Nannina Spanò e Filiberto Chiabrando. Gli approfondimenti legati alle tesi di laurea riguardano nel primo caso le relazioni tra la modellazione 3D dai metodi *reality based* per sviluppare applicazioni di *virtual reality* (Carla Borriello), mentre il secondo la strutturazione di un HBIM (*Heritage Building Information Modelling*) che per definizione si origina anch'esso da nuvole di punti di natura fotogrammetrica o laser scanning (Raffaella Stano).

This manuscript has the role of reporting an interesting teaching experience and two other study activities carried out within the master thesis, each originating from the didactic internship carried out by the DIRECT student team of the Politecnico di Torino in Tolentino, aimed at the 3D survey of the convent complex. The first experience is linked to the workshop of "Digital photogrammetry and 3D scans for the survey of cultural heritage" (a.y. 2016-17), coordinated by Nannina Spanò and Filiberto Chiabrando. The in-depth studies related to the degree thesis concern in the first case the relationships between 3D modelling from reality based methods to develop virtual reality applications (Carla Borriello), while the second the structuring of a HBIM (Heritage Building Information Modeling) which by definition is it also originates from photogrammetric or laser scanning point clouds (Raffaella Stano).

Carla Borriello, laureata magistrale in in Restauro e valorizzazione del parimonio, Politecnico di Torino, DAD
carlaborry@gmail.com

Raffaella Stano, laureata magistrale in Ingegneria Edile, Politecnico di Torino, DIATI
raffaellastano@gmail.com

Nannina Spanò, professore associato di Geomatica, Politecnico di Torino, DAD
antonia.spano@polito.it

Filiberto Chiabrando, professore associato di Geomatica, Politecnico di Torino, DAD
filiberto.chiabrando@polito.it

Andrea Lingua, professore ordinario di Geomatica, Politecnico di Torino, DIATI
andrea.lingua@polito.it

1. Esperienze di estrazione di elaborati 2D e modellazione 3D da nuvole di punti

Lo stage didattico del team DIRECT del Politecnico di Torino tenutosi nell'area del terremoto del Centro Italia (San Severino Marche e Tolentino) nel febbraio 2017 incontrò con grande rapidità il favore degli studenti. Sia nell'area dell'ingegneria che nell'area dell'architettura, fu semplicissimo ottenere numerose adesioni nonostante la sessione di esami, e lo stage si svolse con una elevatissima raccolta di dati, accompagnata da un coinvolgimento anche emotivo da parte degli studenti e dei tutors, per i contatti con la popolazione e il realizzare tangibilmente quanto le ferite incombessero sul territorio, sul patrimonio costruito e sugli animi delle persone.

I risultati dello stage spinsero gli autori a proporre il tema del complesso di San Nicola a Tolentino come caso studio del workshop "Fotogrammetria digitale e scansioni 3D per il rilievo di beni culturali" offerto nelle lauree magistrali dell'area dell'architettura nel secondo semestre, cioè appena rientrati dallo stage. Fu una decisione ponderata, non semplice poiché era scontato che gli studenti iscritti al workshop non corrispondevano ai partecipanti allo stage e non si sarebbe potuto tornare nei luoghi colpiti nell'immediato; ben più importante era la considerazione che uno dei fondamenti indispensabili per svolgere un rilievo, strumentale o meno tecnico, è la visione e analisi diretta dell'oggetto di studio, la possibilità di entrare in contatto diretto per comprenderne i caratteri profondi.

Una considerazione importante che spinse nella direzione di adottare tale scelta consisteva proprio nella possibilità di valutare quanto la gestione di nuvole di punti, dense e accurate, estremamente ricche di informazioni metriche e radiometriche, potesse costituire una buona base conoscitiva anche senza la visione diretta dell'oggetto di studio, o quanto invece i modelli non offrissero che una pallida e non significativa replica.

I risultati che gli studenti furono in grado di elaborare, con un entusiasmo e interesse che non era distante da quello che aveva distinto chi aveva partecipato direttamente, ci convinsero dell'efficacia dell'esperienza.

È risultata convincente quindi anche l'enorme potenzialità che le nuvole dense possono offrire, seppur maneggiate da studenti non certo abituati quanto chi utilizza i metodi della geomatica e la modellazione con frequenza molto più elevata. Ovviamente gli studenti poterono avvalersi di una prima fase didattica ricca di esercitazioni strumentali in grado di fornir loro una consapevolezza delle operazioni da svolgere durante le fasi di acquisizione dei dati: da quelli topografici, alle scansioni laser e dati fotogrammetrici.

Questa esperienza positiva si aggiungeva a un'altra, che aveva condotto a rinforzare l'idea che disporre di nuvole 3D può non solo mettere nelle condizioni di svolgere applicazioni di modellazione 3D, ma anche di poter sviluppare una conoscenza piuttosto approfondita dell'oggetto di studio, potendo entrare in contatto diretto con un modello digitale che lo rappresenta sotto forma di nuvola di punti. Nel settembre e ottobre 2017 persistenti anomalie termiche avevano contribuito a provocare gravi ed estesi incendi boschivi nell'arco alpino (e anche in altre zone italiane), impedendo di fatto lo svolgersi dei tradizionali sopralluoghi in un'area di studio prescelta da un altro corso; la disponibilità di dati a grandissima scala derivati da rilievi metrici 3D, sempre acquisiti dal team DIRECT, anche in quel caso consentì lo svolgersi consueto dell'Atelier "Riabitare le Alpi"[1].

Ritornando al caso di Tolentino, agli studenti furono riferite in dettaglio le modalità della fase di raccolta dati, furono forniti loro i dati acquisiti e furono messi nelle condizioni di sperimentare i versanti operativi della registrazione di scansioni terrestri, così come ottenere nuvole di punti fotogrammetriche grazie all'impiego della tecnica *Structure from Motion* (SfM).

Gli obiettivi principali del corso[2], oltre a sperimentare le tecniche in applicazioni che sfidino le capacità dei metodi geomatici nel fornire svariate risposte alle esigenze di documentazione 3D, spesso declinate in domande anche molto più specifiche, consistono nell'acquisire una sensibilità nel considerare la qualità dei risultati, in termini sia puramente metrici, sia in termini di ricchezza di informazioni geometriche e radiometriche. Inoltre nei corsi di geomatica viene sempre richiesta la capacità di comunicare i risultati tramite elaborati 2D (che integrano ortofoto ad alta risoluzione nei disegni vettoriali) o modelli 3D, nelle diverse configurazioni di modelli digitali di elevazione (DEM *Digital Elevation Model*), di superficie (DSM *Digital Surface Model*), modelli triangolati continui (*mesh*) con *textures* costituite da immagini orientate dal punto di vista fotogrammetrico oppure privi di immagini che enfatizzano la sola geometria.

Benché alcuni risultati di riflessione sui modelli della basilica di San Nicola di Tolentino siano stati già in parte riferiti[3], la sequenza prossima di immagini è una breve selezione di analisi ed elaborati eseguiti da diversi gruppi di lavoro che pensiamo possano rendere conto dell'attenzione con la quale sono stati eseguiti.

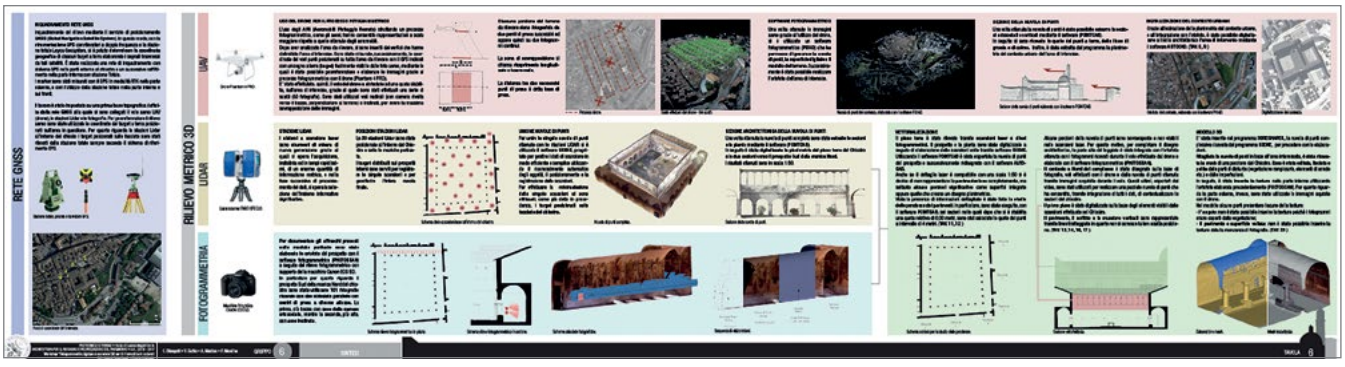


Figura 1. Comparazione di metodi laser scanning e fotogrammetrici in relazione agli obiettivi di descrizione delle diverse componenti della fabbrica che ciascun metodo consente di perseguire (allievi: C. Blangetti, V. Dutka, A. Martina, P. Mondino).

Figura 2. Repertorio dei beni di interesse storico-architettonico e artistico sotteso dal complesso monumentale della basilica di San Nicola a Tolentino visualizzato tramite la nuvola del volo fotogrammetrico, con quadro storico delle trasformazioni della fabbrica (tavole a, b, allieve: M.C. Polacco, B. Quaglio, A. Rabbia, J. Ravagli; tavola c, allievi: C. Blangetti, V. Dutka, A. Martina, P. Mondino).

Per fondare l'esperienza, i metodi laser scanning e quelli basati su immagini (fotogrammetria digitale terrestre ed aerea, da UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*) sono confrontati e integrati, in quanto l'esperienza diretta pone nelle condizioni di acquisire consapevolezza su quanto ciascun metodo possa contribuire agli obiettivi finali (Figura 1).

Il percorso di studio sui metodi strumentali di rilievo 3D e la loro applicazione, viene accompagnato da una ricerca bibliografica che fornisca un quadro storico opportuno per poter conoscere i fondamenti della storia della fabbrica; la Figura 2 riporta un campione ristretto delle ricognizioni eseguite.

Gli obiettivi di documentazione e modellazione 3D di ciascun gruppo, dopo l'elaborazione del volo fotogrammetrico complessivo (Figura 3), furono ripartiti tra la basilica e il chiostro, secondo libera scelta dei gruppi di allievi.

Gli obiettivi descrittivi del complesso architettonico sono organizzati secondo differenti scale di analisi, da quella urbana ambientale raggiunta tramite la fotogrammetria UAV, a quella architettonica principalmente legata alle scansioni laser e integrate da fotogrammetria terrestre, fino alla scala degli elementi architettonici e del loro dettaglio. Proseguendo con il campione di elaborati scelti, si può osservare in Figura 4 a, b il mapping a partire da ortofoto e nuvola di punti a scala urbana con le sezioni ambientali dei volumi edificati, nel denso tessuto urbano del centro di Tolentino. In Figura 5 si può osservare una rivisitazione dei tradizionali

Figura 3. Nuvola di punti generata dall'elaborazione SfM di immagini del volo UAV, con riprese nadirali e inclinate (allieve: M.C. Polacco, B. Quaglio, A. Rabbia, J. Ravagli).

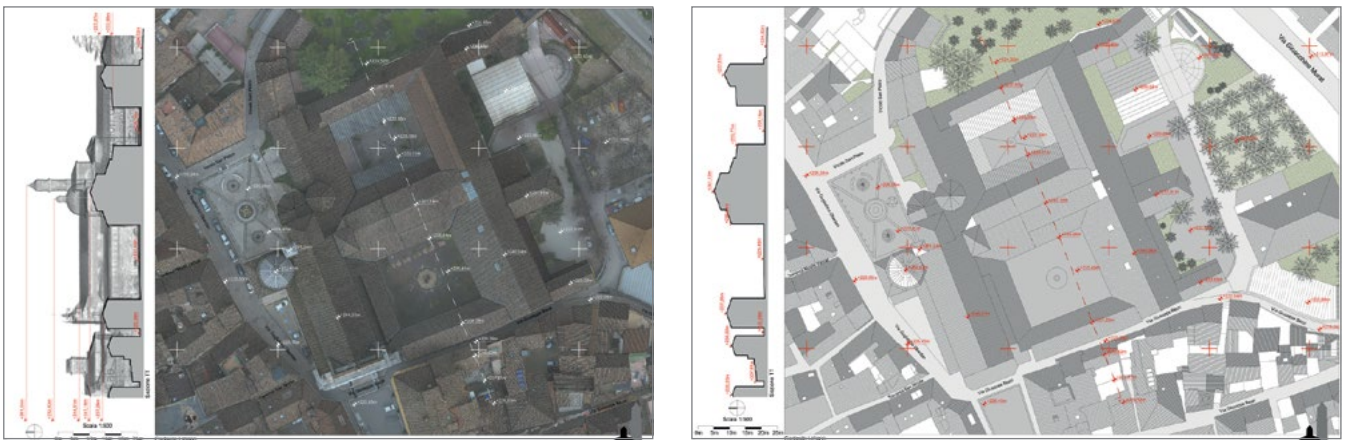


Figura 4. Realizzazione di elaborati che integrano l'ortofoto da UAV (a) e la relativa restituzione vettorale (b) con esame della nuvola di punti che consente la sezione a scala urbana dei volumi edificati e la distribuzione delle quote in mappa (allievi: C. Blangetti, V. Dutka, A. Martina, P. Mondino).

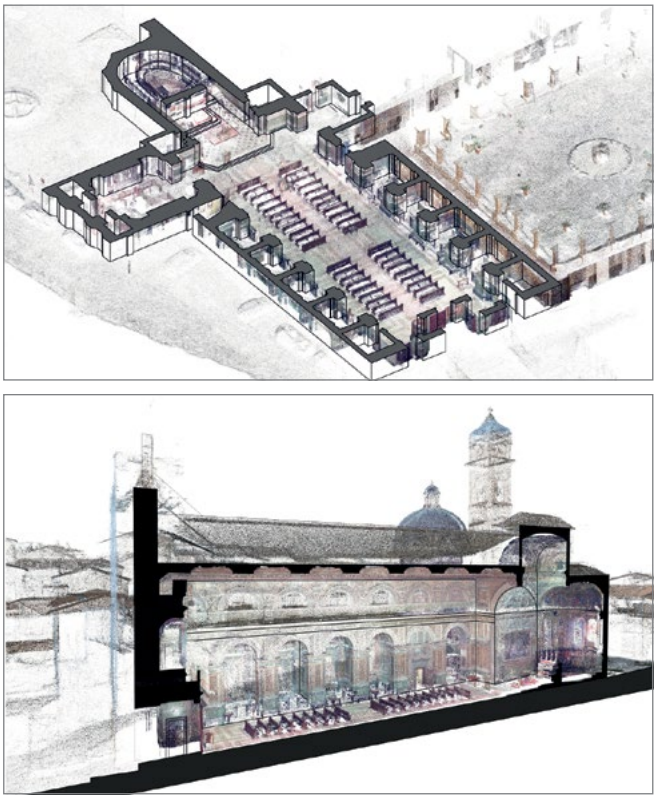


Figura 5 a, b. Tipici spaccati assonometrici che caratterizzano tradizionalmente la rappresentazione architettonica, attualizzati a partire dalle sezioni della nuvola integrata, aerea e terrestre, da scansioni 3D acquisite all'interno della chiesa (allievi: G. Curreli, D. Einaudi, M. Fontana, G. Piras).

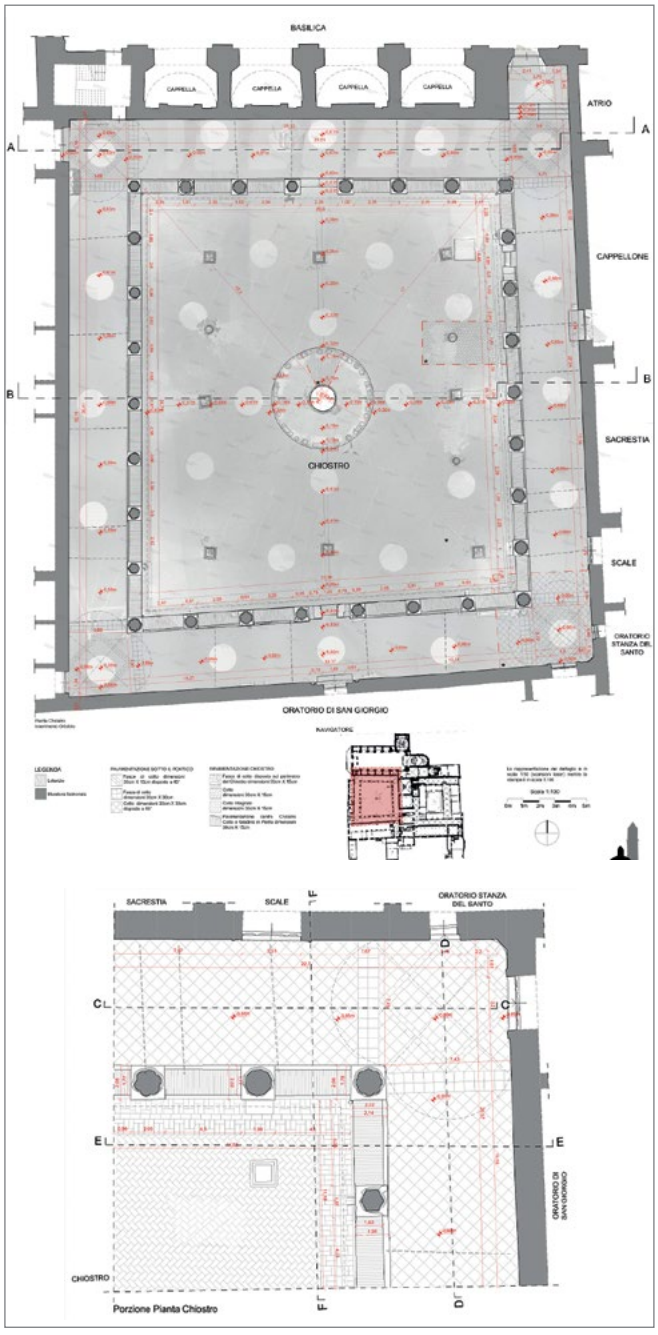


Figura 6. Restituzione della pianta del chiostro, con campionamento delle sezioni delle colonne composite, appartenenti a diverse stratificazioni delle fasi costruttive. (a) pianta complessiva; (b) stralcio di una porzione di pianta (allievi: C. Blangetti, V. Dutka, A. Martina, P. Mondino).

spaccati assonometrici tipici della rappresentazione architettonica, attualizzati e prodotti a partire da sezioni della nuvola punti LiDAR (interna alla chiesa) integrata alla nuvola esterna (generata da fotogrammetria UAV).
La restituzione delle nuvole alla scala architettonica, principalmente derivate da tecnica laser scanning, origina i disegni architettonici tradizionali in pianta e sezione verticale

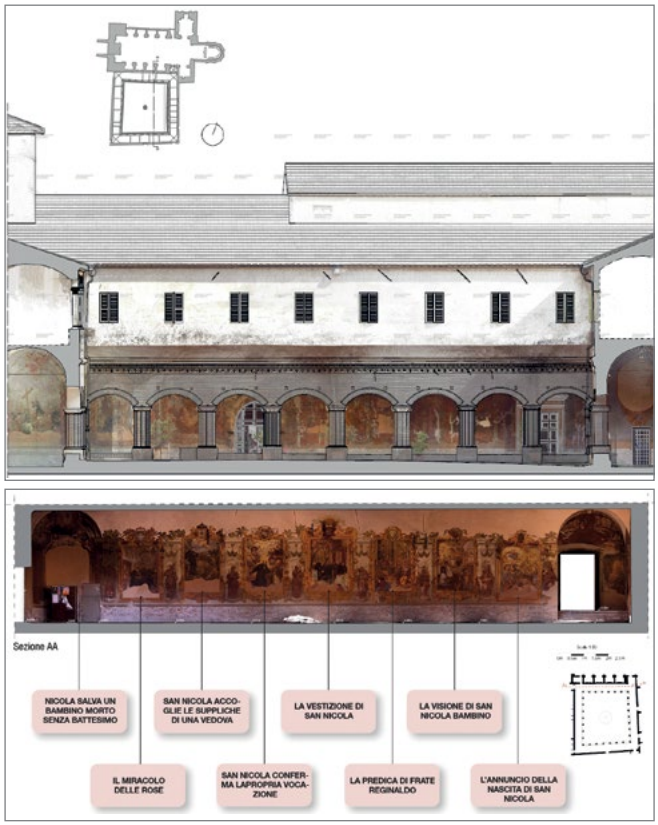


Figura 7. Prospetti architettonici con ortofoto derivate da applicazioni di fotogrammetria terrestre (close range) integrati. (a) sezione nord sud del chiostro con restituzione del fronte orientale (allieve: M.C. Polacco, B. Quaglio, A. Rabbia, J. Ravagli); (b) ortofoto della manica porticata nord (allievi: C. Blangetti, V. Dutka, A. Martina, P. Mondino).

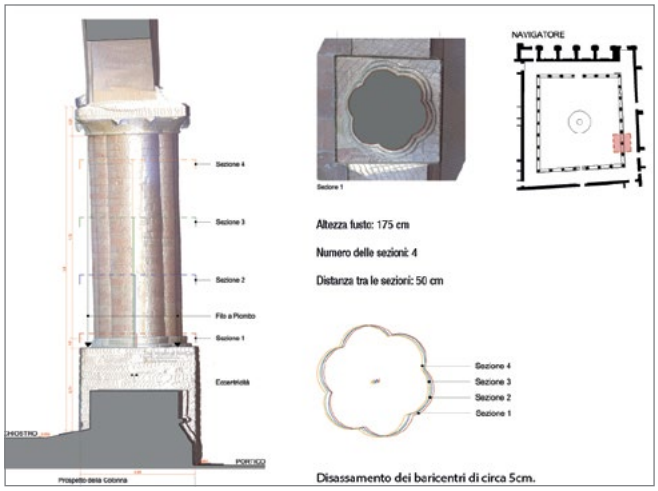


Figura 8. Studio del fuori piombo di una delle colonne composite del chiostro (allievi: C. Blangetti, V. Dutka, A. Martina, P. Mondino).

Figura 9. Comparazione finale tra modello fotogrammetrico derivato da immagini UAV e terrestri, con modello laser scanning che evidenzia una superiorità delle informazioni radiometriche nel primo caso e delle capacità descrittive 3D del secondo (allieve: M.C. Polacco, B. Quaglio, A. Rabbia, J. Ravagli).

(Figura 6), quando opportuno o necessario integrati con le ortofoto derivate da applicazioni di fotogrammetria terrestre (Figura 7 a, b).
L'elevato dettaglio delle acquisizioni consente di analizzare criticità costruttive o danni di varia natura, tra i quali lo studio del fuori piombo delle colonne composite del colonnato del chiostro (Figura 8).
In ultimo uno studio comparativo tra le capacità descrittive della tecnica fotogrammetrica e quella laser scanning, realizzate in una porzione sud-orientale del chiostro consentono di valutare la superiore qualità delle textures fotogrammetriche e alternativamente la generale capacità di descrivere gli elementi nello spazio e con caratteri 3D completi della tecnica laser scanning (Figura 9).

2. Un'applicazione di realtà virtuale per comunicare le criticità strutturali della basilica di Tolentino

Un nuovo esito degli studi svolti sulla basilica di San Nicola fu la tesi che a partire dal rilievo metrico 3D della basilica adottò l'obiettivo di realizzare un'applicazione di realtà virtuale per comunicare i problemi strutturali delle componenti architettoniche della chiesa[4].
Considerando la vulnerabilità del patrimonio costruito, la tesi mira a evidenziare la funzione rilevante dei metodi geomatici di rappresentazione dei beni architettonici e dei fenomeni connessi a partire dall'impiego di sistemi LiDAR e di fotogrammetria UAV, definendo un ruolo significativo che questo tipo di documentazione può fornire nel supporto ai progetti di conservazione dell'esistente.
Le relazioni tra le tematiche della modellazione 3D a partire dalle cosiddette tecniche *reality based* della geomatica, la realtà virtuale che da esse può essere facilmente ottenibile e le conseguenze sociali e culturali dell'uso nell'ambito del patrimonio e dei musei sono da alcuni anni fortemente dibattute e i continui sviluppi posso essere seguiti nella letteratura di settore[5].

Figura 10. Modello 3D accurato derivato da scansioni laser e integrato con textures fotogrammetriche ad alta definizione della porzione del coro della chiesa e muratura di controfacciata, che rappresenta uno dei punti più critici dal punto di vista strutturale dell'intera basilica.

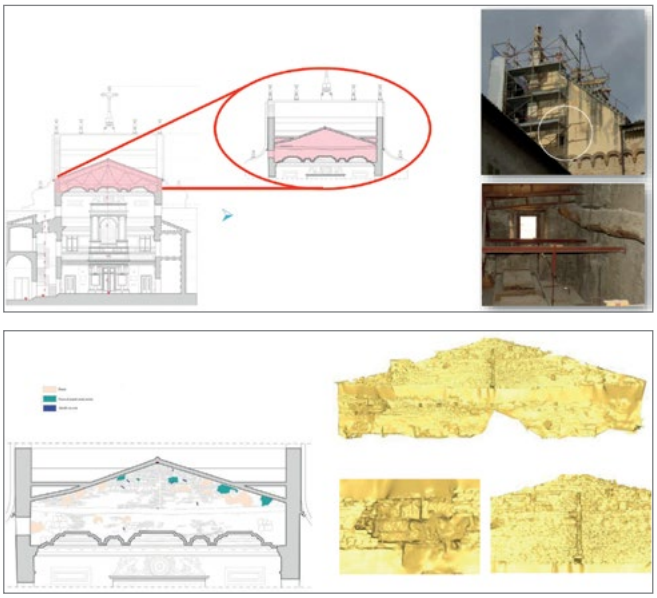


Figura 11. Studio delle lesioni del muro di controfacciata nel sottotetto della basilica di San Nicola. Restituzione della porzione di controfacciata del sottotetto nella sezione complessiva della chiesa (a) e analisi a scala maggiore a partire dalla modello continuo ricavato dalla nuvola LiDAR; con l'identificazione di murature di diverse tessiture, di rinfazzi cementizi e identificazione di catene e altri apparati tecnologici metallici (b).

L'applicazione alla basilica di San Nicola a Tolentino ha rappresentato una simulazione per valutare e dimostrare l'opportunità di realizzare esperienze immersive relative anche a ricognizioni tecniche digitali, utili non solo per rappresentare e diffondere la consapevolezza della vulnerabilità del patrimonio a un pubblico allargato, ma, considerando anche che le visite virtuali nel futuro si stratificheranno nel tempo, esse possono supportare il monitoraggio della fabbrica anche da parte di attori preposti alla tutela e conservazione.
La tesi, oltre a occuparsi delle fasi preliminari di gestione del rilievo integrato laser scanning e fotogrammetrico da UAV della basilica, approfondendo la conoscenza delle fasi costruttive della fabbrica per meglio interpretare i complessi problemi strutturali evidenziati e acuiti dagli eventi sismici, fu direzionata a presentare in dettaglio e tramite l'applicazione di realtà virtuale i problemi connessi al ribaltamento della facciata[6] e le importanti lesioni visibili nel sottotetto, rilevati dal team DIRECT contestualmente al rilievo dell'intera basilica.

3. I modelli metrici 3D multiscala e multisensore per fondare un HBIM del chiostro di Tolentino

Per rispondere all'elevato grado di complessità della documentazione del patrimonio costruito, e per basare i progetti di conservazione, i metodi di acquisizione della geomatica già da svariati anni si sono attestati sui metodi di rilievo metrico 3D in grado di fornire grandi moli di informazioni rappresentati da nuvole dense e accurate. Ciò avviene sfruttando le tecnologie LiDAR e quelle che impiegano sensori passivi, oltre che la fotogrammetria digitale, che ha potuto avvalersi delle innovazioni tecnologiche occorse alle camere, alla loro calibrazione, e anche al punto di vista, che si giova ormai facilmente dei mezzi UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) potendo sfruttare l'integrazione delle tecniche di *image matching* e degli algoritmi *Structure From Motion* (SfM) derivati dalla *Computer Vision*.
Mentre l'informazione spaziale si è sempre avvalsa dei sistemi informativi geografici (GIS) per la gestione di dati georiferiti, all'estrema centralità della componente 3D alla base della modellazione degli ambienti costruiti, e all'esigenza di sempre maggiore specializzazione è corrisposto negli ultimi anni un uso sempre più diffuso dei sistemi BIM (*Building Information Modelling*) – soprattutto nella loro accezione

Figura 12. Importazione del modello 3D texturizzato nel software Unreal (a), e fasi dell'organizzazione di contenuti informativi da offrire nella visita virtuale (b).

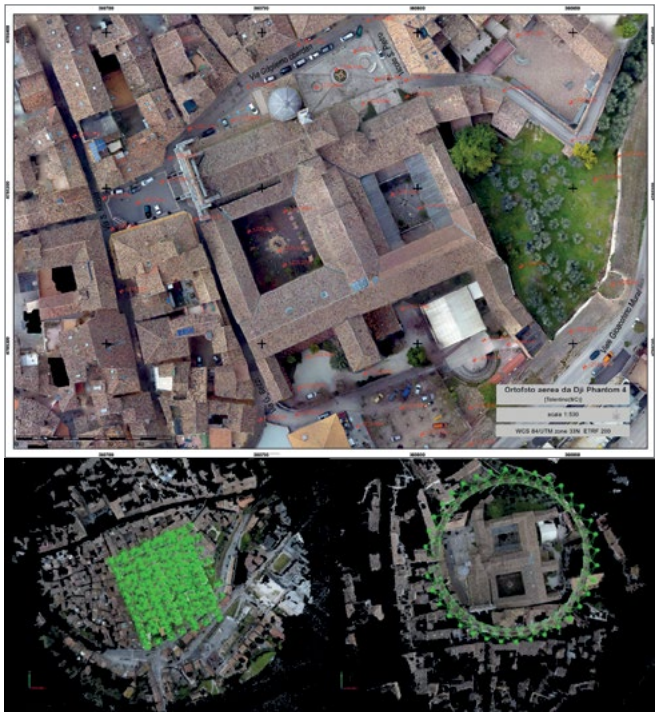


Figura 13. Ortofoto georiferita del complesso monumentale (sopra) e fasi dell'elaborazione del blocco di immagini da UAV quadrimotore, costituito da immagini nadirali e oblique (sotto).

Figura 14. Esempio di analisi di unione di fotogrammi consecutivi estratti da video acquisiti da mini UAV.

	Volte a botte			
	EST	NORD	OVEST	SUD
Scostamento medio [mm]	22	26	25	25
SQM [mm]	5	14	18	15
Minimo [mm]	0,002	0,005	0,008	0,004
Massimo[mm]	60	54	70	57

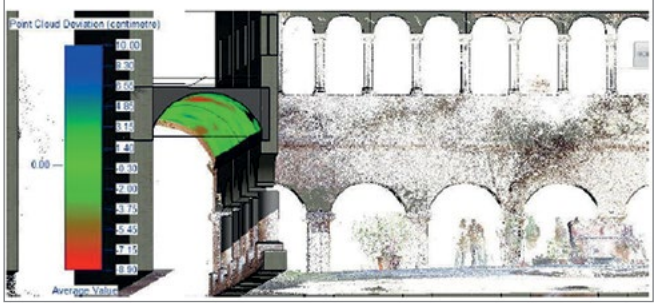


Figura 15. Analisi degli scostamenti tra il modello BIM e la nuvola di punti.

Figura 16. Proposta di organizzazione in sottolivelli del livello di sviluppo G della normativa 11337/4 del 2017.

HBIM (*Heritage Building Information Modelling*) – per la prerogativa di essere generati da nuvole di punti e di essere orientati al patrimonio costruito[7].

La tesi in oggetto[8] ha individuato come fine ultimo della modellazione multi-scala e multi-sensore del chiostro del complesso monumentale di Tolentino proprio la strutturazione di un HBIM, organizzando il database a oggetti delle entità geometriche derivate dal rilievo 3D in modo da soddisfare le esigenze di archiviazione di insiemi eterogenei di dati volti alla conservazione del bene.

Malgrado questo assunto di base e lo sfondo siano legati ai propositi dello stage e dalle attività della task force del Politecnico di Torino di indagare le tecniche di *rapid mapping*, aereo e terrestre, in condizioni di emergenza o per monitorare le strutture architettoniche colpite dal sisma, la tesi è anche ricca di diversi obiettivi intermedi. I risultati del processo fotogrammetrico con tecnica SfM applicato alla scala urbana e ambientale e con immagini nadirali e oblique sono stati confrontati in seguito all'elaborazione avvenuta mediante tre software diversi (Pix4D Mapper, VisualSFM, PhotoScan) per valutare le diverse potenzialità di ciascun software. A valle della generazione dei modelli di punti inoltre, è stata eseguita un'analisi comparata delle densità delle nuvole, che è un parametro qualitativo importante per stimarne il contenuto informativo (Figura 13).

Per quanto riguarda la scala architettonica, affrontata nel chiostro mediante l'ottimizzazione della nuvola di punti laser scanning integrata a quella derivata dai voli UAV, la tesi ha anche sperimentato l'utilizzo di video registrati da un mini drone multi-rotore a distanza ravvicinata dalle murature delle maniche porticate del chiostro, per valutarne le accuratezze e per integrare nel blocco di immagini acquisite da terra anche quelle estratte dai video e per sviluppare quindi un progetto multi-sensore più completo.

La costruzione del modello HBIM è stata seguita da un controllo dell'aderenza tra le entità geometriche parametriche e i modelli densi di partenza (Figura 14), dall'organizzazione del modello HBIM in livelli di sviluppo secondo la normativa vigente (11337/4 del 2017) e infine dall'elaborazione di una proposta di organizzazione di ulteriori sottolivelli del livello G, il più sviluppato nella scala A-G della normativa[9].

Note

[1] Cristina Cuneo, Daniele Regis, Antonia Spanò, *Living the Alps*, in «ArcHistoR Extra», 7, 2019.

[2] Un'altra occasione in cui si ebbe l'opportunità di presentare i risultati di questo workshop, che si tiene tutti gli anni, fu in occasione dei rilievi 3D della chiesa di Sant'Uberto a Venaria: Elisabetta Donadio, Giulia Sammastano, Filiberto Chiabrando, Antonia Spanò, *Reality based modelling training. Photomodelling and LiDAR techniques for the St. Uberto Church in Venaria Reale*, in proceeding del XII congresso UID, 2015.

[3] Alcuni elaborati e commenti alle analisi eseguite sono stati riportati nel contributo a p. 206.

[4] Carla Boriello, *From point cloud based models to VR visualization for Cultural Heritage at risk: St. Nicola Church in Tolentino*, tesi di laurea magistrale in Architettura per il restauro e la valorizzazione del patrimonio, Politecnico di Torino, relatori Filiberto Chiabrando, Antonia Spanò, luglio 2018.

[5] A titolo esemplificativo si segnalano: Nada Bates-Brkljac, *Virtual Reality*, Nova Science Publishers, New York 2012; Andrea Martina, *Virtual Heritage: new technologies for edutainment*, tesi di dottorato di ricerca in Ingegneria informatica e dei sistemi, Politecnico di Torino, XXV ciclo (2014), tutor A. Bottino. Eike Falk Anderson, Leigh McLoughlin, Fotis Liarokapis, Christopher Peters, Panagiotis Petridis, Sara Freitas, *Serious Games in Cultural Heritage*, in M. Ashley, F. Liarokapis (a cura di), *The 10th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST - State of the Art Reports*, 2009; Luca Cipriani, Filippo Fantini, *Digitalization Culture vs Archaeological Visualization: Integration of Pipelines and Open Issues*, in «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», Vol. 42-2(W3), 2017, pp. 195-202.

[6] Cfr. in questo volume il contributo a p. 102.

[7] Anche la tematica dell'HBIM è sicuramente amplissima e in rapido sviluppo. Per fornire qualche esempio: Sotiris Logothetis, A. Delinasiou, Efstratios Stylianidis, *Building Information Modelling for Cultural Heritage: A review*, in «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», II-5/W3, 2015, pp. 177-183. Maurice Murphy, Eugene McGovern, Sara Pavia, *Historic Building Information Modelling –Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture*, in «ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing», vol. 76, 2013; DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006. Filippo Diara, Fulvio Rinaudo, *Open source HBIM for cultural heritage: a project proposal*, in «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», vol. XLII-2, 2018, pp. 303-309; DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-303-2018.

[8] Raffaella Stano partecipò in qualità di studente allo stage didattico per il rilievo 3D del complesso di Tolentino che si tenne dal 20 al 24 febbraio del 2017; proseguì poi il suo studio con un'esperienza di tirocinio incentrata sull'uso di tecniche per l'acquisizione e gestione di dati georiferiti, concludendo il percorso con la tesi di laurea magistrale: Raffaella Stano, *Acquisizioni multi-sensore nel chiostro di San Nicola a Tolentino per il modello parametrico*, tesi di laurea magistrale in Ingegneria edile, Politecnico di Torino, relatori Andrea Lingua, Antonia Spanò, ottobre 2017.

[9] Il presente testo è frutto di ricerche ed elaborazioni comuni, tuttavia, in particolare, il paragrafo 1 è da attribuirsi a Nannina Spanò e Filiberto Chiabrando, il 2 a Carla Borriello, Filiberto Chiabrando e Nannina Spanò, e il 3 a Raffaella Stano, Andrea Lingua e Nannina Spanò.

BY-NC-SA

Fotogrammetria terrestre e tecnologia tablet in scenari post sisma: il caso studio della chiesa di Sant'Agostino in Amatrice

Terrestrial photogrammetry and tablet technology in post-earthquake scenario: case study of Sant'Agostino Church in Amatrice

VINCENZO DI PIETRA, PAOLO DABOVE, ANDREA LINGUA

Vincenzo Di Pietra, dottore di ricerca in Urban and regional development, assegnista in Geomatica presso il Politecnico di Torino, DIATI
vincenzo.dipietra@polito.it

Paolo Dabove, ricercatore in Geomatica, Politecnico di Torino, DIATI
paolo.dabove@polito.it

Andrea Lingua, professore ordinario di Geomatica, Politecnico di Torino, DIATI
andrea.lingua@polito.it

Abstract

Negli ultimi anni, i numerosi disastri naturali che hanno colpito il territorio italiano hanno generato la necessità che i primi interventi possano seguire procedure rapide e sicure, in grado di portare a termine operazioni di ricognizione, ispezione e rilievo di strutture instabili e di beni architettonici danneggiati. In particolare, come già evidenziato in numerosi contributi di questo volume, nelle prime fasi successive a un terremoto, numerosi operatori – quali Vigili del Fuoco, protezione civile, militari e ispettori geotecnici, esperti delle strutture e dei beni culturali – devono operare in prossimità di strutture danneggiate, mettendo a rischio la propria sicurezza a causa di possibili collassi. L'obiettivo principale per ridurre il rischio è minimizzare il tempo di esposizione al manufatto danneggiato e ciò può essere ottenuto attuando tecniche fotogrammetriche terrestri al fine di eseguire dei rilievi speditivi ad alto contenuto informativo. In questa esperienza si vuole dimostrare la possibilità di utilizzare la tecnologia tablet per portare a termine operazioni di rilievo speditivo fotogrammetrico in scenari emergenziali. Il caso studio preso in esame è ancora una volta la chiesa di Sant'Agostino in Amatrice, altamente danneggiata dal sisma del 2016 in Centro Italia, e oggetto degli studi da parte della task force del Politecnico di Torino.

In recent years, the several natural disasters affecting the Italian territory, led the growth of the demand of secure on-field procedures able to accomplish reconnaissance, inspection and survey of damaged cultural heritage and instable structures. In fact, as underlined in previous manuscripts during the early-impact response, firefighters, civil protection, soldiers and geotechnical inspectors, experts in structures and cultural heritage must operate nearby damaged structures risking their lives in case of possible collapses. To minimize the risk, the aims is to reduce the exposure time by mean of photogrammetric technologies to accomplish rapid survey rich of digital information. The reported study wants to investigate the use of tablet technology for rapid close-range photogrammetry in post-earthquake scenario. The case study considered in this work is once more the Sant'Agostino church in Amatrice, an architectural asset highly damaged by the earthquake occurred in 2016 in the central part of Italy, subject to the studies of the Politecnico di Torino task force.

Introduzione

Tra le varie fasi dell'*emergency management*, vi è la necessità di una rapida e completa documentazione circa lo stato di fatto delle opere danneggiate dall'evento catastrofico. A tale scopo, le squadre di primo intervento necessitano di strumenti di supporto a una rapida documentazione dei danni occorsi al

patrimonio costruito e metodologie di rilievo dello stato di fatto. Tali strumenti devono permettere di preservare l'incolumità degli operatori che si interfacciano con zone ad alto rischio, come ad esempio i centri urbani danneggiati dal sisma del 2016. Di particolare interesse è l'esecuzione di un rilievo e la successiva documentazione sotto forma di modelli digitali metricamente accurati e dati spaziali georeferenziati che riproducano le caratteristiche dell'oggetto di ispezione con una elevata affidabilità.

Al pari di altre esperienze qui riportate, il presente studio ha l'obiettivo di proporre alle figure preposte al primo intervento, tecnologie e metodologie per portare a termine operazioni di rilievo speditivo in contesti di rischio per la sicurezza personale. In particolare, questo lavoro vuole evidenziare la possibilità di utilizzare tecnologia tablet come sensore primario in operazioni di rilievo fotogrammetrico 3D. La crescente diffusione di dispositivi *mass-market* a basso costo quali smartphone e tablet consente infatti anche agli utenti meno esperti di avere in mano piattaforme multi-sensore utili in ambito fotogrammetrico. I modelli tridimensionali ottenuti con i sensori ottici installati nei tablet, se supportati da una corretta metodologia di acquisizione e *processing* dei dati, possono essere utilizzati nelle operazioni post-sisma.

A tal fine, l'oggetto del rilievo speditivo è la chiesa di Sant'Agostino di Amatrice (RI), un bene architettonico altamente danneggiato dal terremoto e di grande importanza per la comunità. La chiesa, come visto, è stata oggetto di rilievo sia nei primi giorni successivi al terremoto del 24 agosto 2016 sia successivamente, ed è situata all'interno della "zona rossa" del centro cittadino, un'area soggetta a restrizioni per l'altro rischio di collassi strutturali[1].

1. La fotogrammetria e i sensori mass-market a supporto del rilievo post-disastro

Quando una struttura viene danneggiata a seguito di un sisma, i Vigili del Fuoco, in coordinamento con il Dipartimento della Protezione Civile, devono eseguire una rapida ispezione post-disastro allo scopo di verificare l'agibilità della struttura e pianificare la sua messa in sicurezza[2]. Spesso la pericolosità di accesso a queste strutture e le difficoltà intrinseche legate al muoversi in contesti emergenziali rendono impossibili le operazioni di ispezione diretta, le quali devono essere sostituite con metodologie di telemisurazione. Tali metodologie devono permettere l'acquisizione di dati spaziali georeferenziati, completi e intelligenti, nel minor tempo possibile, a distanza di sicurezza dall'oggetto e agevolarne l'acquisizione per i diversi operatori coinvolti (esperti e non). Tale necessità viene ben soddisfatta dalla fotogrammetria terrestre e aerea, che permette di ridurre i tempi di esposizione degli operatori ai rischi di permanenza garantendo nel contempo l'acquisizione di dati digitali ad alto contenuto informativo[3].

La fotogrammetria è una metodologia che permette di estrarre informazioni spaziali della realtà, metricamente accurate, attraverso le relazioni proiettive e geometriche tra immagini acquisite con sensori ottici e scena osservata[4]. Acquisendo una serie di fotogrammi di uno stesso oggetto statico, si è in grado di generare un modello digitale tridimensionale dell'oggetto del rilievo a elevata risoluzione e a un costo relativamente contenuto[5]. Da tale modello è possibile estrarre informazioni a supporto delle fasi decisionali degli organi preposti ed effettuare analisi spaziali e modellazioni fisiche sulla realtà simulata. Le applicazioni principali della fotogrammetria a supporto dell'*emergency management* sono la valutazione dei rischi, l'individuazione di danni strutturali, il supporto per interventi di recupero e adeguamento sismico.

Un altro aspetto fondamentale di tale lavoro è la considerazione che l'enorme diffusione delle tecnologie *mass-market* quali smartphone e tablet fornisce agli utenti potenti strumenti dotati di ricevitori GNSS[6] e di sensori ottici in grado di acquisire dati utili al procedimento fotogrammetrico. L'uso di tali strumenti però deve essere accompagnato dall'utilizzo di procedure e criteri tipici della fotogrammetria, che garantiscano la generazione di prodotti accurati sia dal punto di vista geometrico che radiometrico.

2. Acquisizione ed elaborazione dei dati

L'acquisizione dei dati, condotta dal team DIRECT (*DIsaster RECovery Team*), è avvenuta in pochi minuti, effettuando una serie di scatti con due tablet commerciali tra i più diffusi in commercio (il Sony Xperia Z2 e l'Apple iPad mini 4)[7]. La funzione di geotag è stata attivata permettendo di acquisire le posizioni dei centri di presa tramite tecnica GNSS. Separatamente, sono state acquisite delle immagini con una fotocamera Canon EOS 5D Mark II, una DSLR (Digital Single-lens Refrex) di alta qualità da utilizzare come dataset di riferimento per le comparazioni[8]. Infine è stato effettuato un rilievo di dettaglio non appoggiato a una rete di inquadramento, utilizzando una stazione totale. L'appoggio non è stato possibile a causa della pericolosità del sito e del breve periodo di stazionamento concesso dagli organi preposti. Anche se non georeferenziato, tale rilievo di dettaglio ha avuto lo scopo di inserire i modelli fotogrammetrici nello stesso sistema di riferimento locale e di valutare la qualità delle elaborazioni.

Il *processing* delle immagini è avvenuto secondo il tradizionale workflow fotogrammetrico composto da estrazione automatica di punti riconoscibili dalle immagini, *matching* di tali punti tra immagini, orientamento interno ed esterno delle prese, generazione di nuvola di punti e calcolo della nuvola densa (Figura 1). La stessa procedura è stata utilizzata per la soluzione di riferimento, un modello 3D della chiesa, ottenuto con una fotocamera DSLR, la quale presenta migliori caratteristiche rispetto ai sensori presenti nei due tablet. Le informazioni riguardanti i modelli tridimensionali generati nel processo fotogrammetrico sono riportate in Tabella 1.

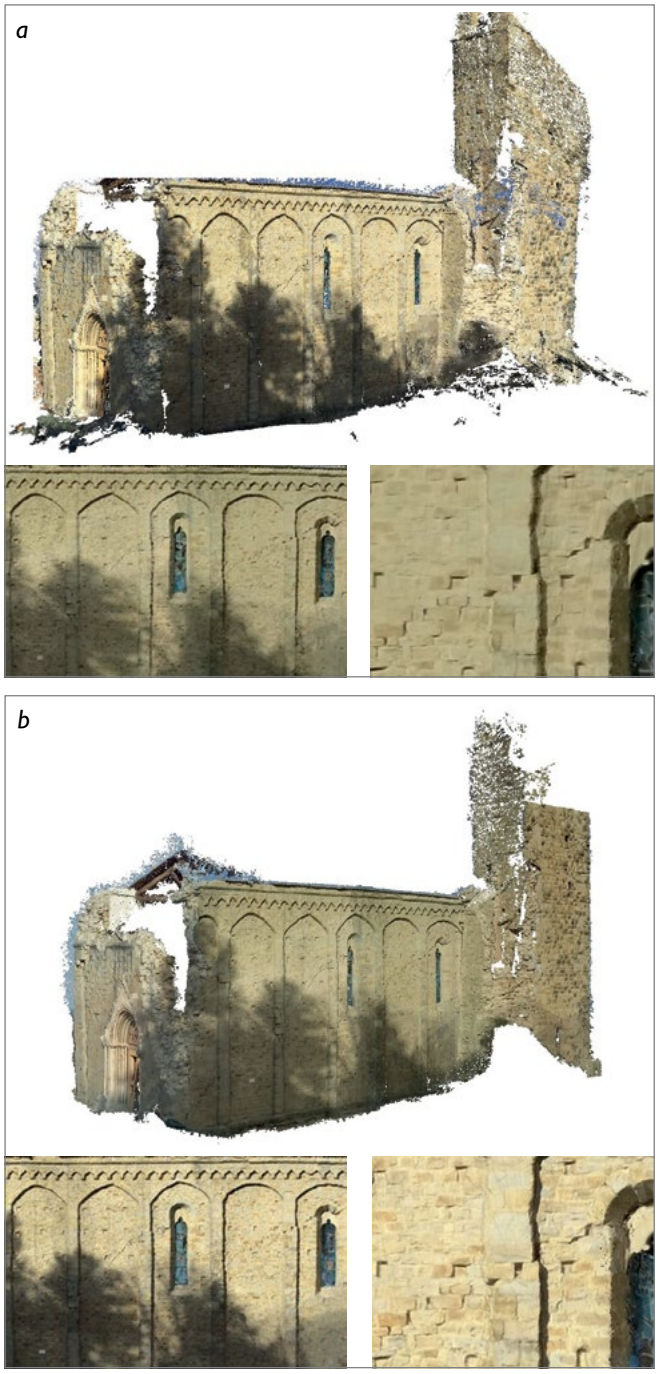


Figura 1. Modello tridimensionale texturizzato della chiesa di Sant'Agostino ad Amatrice e particolari ottenuti con le immagini acquisite da tablet iPad mini 4 (a) e da Sony Xperia Z2 (b).

	iPad mini 4	Xperia Z2	Canon 5D
Foto [n°]	26	45	188
Punti [n°]	4.846.278	4.719.731	13.960.996
Facce [n°]	13.288.273	12.255.344	23.953.462
Vertici [n°]	7.125.846	6.438.499	12.176.173
Dim [MB]	128	122	359

Tabella 1. Informazioni relative ai tre modelli 3D, generati con i tablet e con la camera DSLR.

3. Analisi e discussione dei risultati

Le analisi sulla qualità dei modelli ottenuti da sensori *mass-market* sono avvenute su una porzione di facciata della chiesa di Sant'Agostino. Quattordici punti naturali in facciata sono stati misurati con una stazione totale e sono stati utilizzati come punti di controllo per il processo fotogrammetrico. In tal modo i modelli ottenuti sono stati scalati e ruotati nel sistema di riferimento locale. Tra questi punti, cinque sono stati utilizzati per la stima degli errori tra i punti misurati e i punti stimati nel processo fotogrammetrico (*check points*). Tali risultati, riportati in Tabella 2, ci forniscono una prima validazione della qualità del modello fotogrammetrico.

	iPad mini 4	Xperia Z2
5 punti di appoggio		
X err. [m]	0,0200	0.0174
Y err. [m]	0,0612	0,0510
Z err. [m]	0,0347	0,0278
9 punti di controllo		
X err. [m]	0,0133	0,0114
Y err. [m]	0,0630	0,0268
Z err. [m]	0,0399	0,0587

Tabella 2. Media degli errori tra le coordinate stimate e i punti misurati.

Successivamente i modelli fotogrammetrici ottenuti con i tablet sono stati comparati con il modello di rifermento, sovrapponendo le nuvole dense e confrontandole con un algoritmo di tipo C2C NN (*Cloud To Cloud Nearest Neighbors*) I valori statistici del confronto tra nuvole sono riportate in Tabella 3 e rappresentati dalle Figure 2 e 3. Si può osserva che l'83% dei punti si discosta dal modello di riferimento di meno di 3 cm nel caso dell'iPad mini 4. Per l'Xperia Z2, nella stessa distanza sono contenuti il 90% dei punti.

Conclusioni

L'utilizzo di strumenti mass-market, quali smartphone e tablet, per applicazioni di rilievo fotogrammetrico speditivo in scenari catastrofici può essere fondamentale per il compimento di differenti tipi di interventi, quali sopralluoghi, ispezioni e rilievi su infrastrutture instabili e beni architettonici danneggiati. Le procedure di utilizzo di questi strumenti devono essere rapide, facili da applicare *in situ*, e idonee a garantire la generazione di modelli tridimensionali da una distanza di sicurezza dalla struttura instabile o difficilmente raggiungibile. La procedura esposta, unitamente all'utilizzo di strumenti a basso costo durante le operazioni di rilievo, ha dimostrato le potenzialità della tecnica fotogrammetrica terrestre anche per gli scopi sopraesposti.

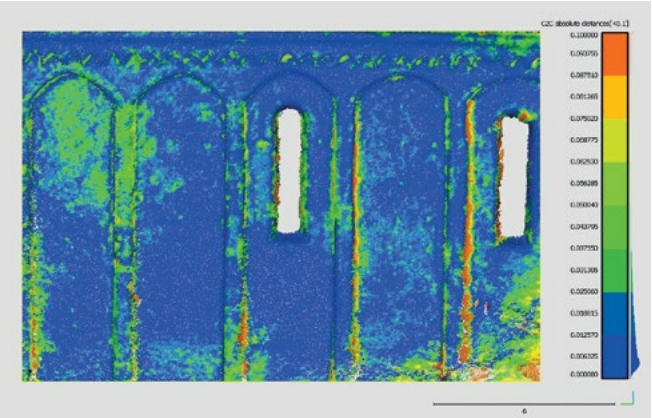


Figura 2. Rappresentazione in scala di colore della distanza assoluta tra modello di riferimento e modello da validare (Apple iPad Mini 4).

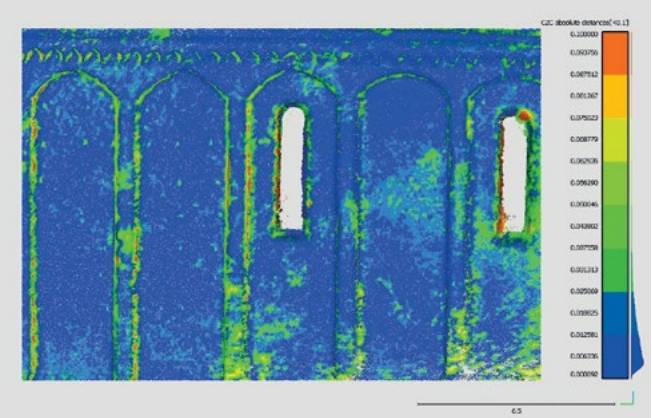


Figura 3. Rappresentazione in scala di colore della distanza assoluta tra modello di riferimento e modello da validare (Sony Xperia Z2).

	Distanza Assoluta C2C [%]	
	iPad mini 4	**Xperia Z2**
D < 1 cm	~ 38,99	~ 21,46
1 cm < D < 2 cm	~ 28,53	~ 52,73
2 cm < D < 3 cm	~ 15, 52	~ 15,71
2 cm < D < 10 cm	~ 16, 95	~ 10,10

Tabella 3. Distanza dei punti e relative percentuali.

Tali procedure, per quanto rapide, devono essere affiancate a operazioni di rilievo topografico in loco e *post-processing* dei dati, per le quali è necessaria la presenza di un utente esperto. Solo in tal modo i prodotti della fotogrammetria potranno rispettare i requisiti di accuratezza e precisione. Nel caso in esame sono stati generati modelli tridimensionali da strumenti *mass-market* (tablets) che si discostano di pochi centimetri rispetto alla realtà (punti misurati mediante tecnica topografica). Le analisi statistiche sui punti di controllo riportano un errore inferiore ai 6 cm lungo le tre componenti del sistema di riferimento. Inoltre, i modelli ottenuti sono stati confrontati con un modello di riferimento generato da una camera professionale. In questo caso, la distanza assoluta risulta inferiore ai 3 cm per l'83% dei punti, dimostrando l'utilità di questi strumenti in situazioni emergenziali.

Note

[1] Questo lavoro di ricerca, come gli altri svolti nei momenti più prossimi agli eventi sismici, ha potuto beneficiare della collaborazione del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco.

[2] Cfr. in questo volume il contributo a p. 198.

[3] Christopher Gomez, Heather Purdie, *UAV-based Photogrammetry and Geocomputing for Hazards and Disaster Risk Monitoring–A Review*, in «Geoenvironmental Disasters» 3 1, 23, 2016; DOI 10.1186/s40677-016-0060-y.

[4] Cfr. in questo volume il contributo a p. 41.

[5] Thomas Schöps, Torsten Sattler, Christian Häne, Marc Pollefeys, *3D modeling on the go: Interactive 3d reconstruction of large scale scenes on mobile devices*, in *Proceedings of 3D Vision (3DV), 2015 International Conference on IEEE*, 2015, pp 291-299. Dieter Fritsch, Miguel Syll, *Photogrammetric 3D reconstruction using mobile imaging*, in «SPIE/IS&T Electronic Imaging, International Society for Optics and Photonics», vol. SPIE 94-11, 2015; DOI: 10.13140/2.1.3031.8886.

[6] Paolo Dabove, Ambrogio M. Manzino, *Accurate Real-time GNSS positioning assisted by tablets: An innovative method for positioning and mapping*, in «GEAM. Geoingegneria Ambientale e Mineraria», 148 (2), 2016, pp. 17-22.

[7] Le dimensioni dei sensori sono riportati di seguito. iPad mini 4: Sensor Size 3,6 x 2,7 mm; Image resolution 3264x 2448 pixels; Pixel size 1,12 micron (square); Xperia Z2: Sensor size 6,17 x 4,55 mm; Pixel size 1,2 micron; Image resolution 3264x 2448.

[8] Lo stesso dataset presentato nel contributo *Valutazione della vulnerabilità sismica della chiesa di sant'Agostino ad Amatrice tramite analisi multitemporali*, Cfr. in questo volume il contributo a p. 147.

BY-NC-SA

Archivio 3D multi-temporale dei danni e crolli per la chiesa di Sant'Agostino in Amatrice in seguito ai diversi eventi

3D multi-temporal archive of damages and collapses in Sant'Agostino church of Amatrice after reiterated seismic events

GIULIA SAMMARTANO, NANNINA SPANÒ, ALESSIA ROSIGNUOLO

Abstract

In questo contributo viene presentata una strategia che consente di poter gestire, analizzare e valutare, in un unico sistema, il complesso insieme di dati che è possibile disporre per ricostruire le condizioni di una fabbrica prima e dopo degli eventi disastrosi. In particolare fotografie storiche e disegni d'archivio possono fornire informazioni utilissime e arricchirsi di maggiori significati o potenzialità descrittive delle condizioni dell'edificio se rese comparabili e spazialmente confrontabili (in 2D e 3D) con altre riferite a tempi diversi della storia della fabbrica. Tale ricostruzione è stata eseguita per la chiesa di Sant'Agostino ad Amatrice, mirando ad una sequenza multi-temporale molto ampia, e sfruttando sia le tecnologie speditive del rapid mapping aereo già presentate, sia la tecnica omografica opportuna per l'assegnazione del riferimento spaziale ai documenti storici.

This manuscript presents a strategy that allows managing, analysing and evaluating in a single system the complex set of data that can be available to reconstruct the conditions of a factory before the disastrous events. In particular, historical photographs and archive drawings can provide very useful information and enrich themselves with greater meanings or descriptive potential of the building conditions if made comparable and spatially measurable (in 2D and 3D) with others referring to different times in the history of the factory. This reconstruction was carried out for the church of Sant'Agostino in Amatrice, aiming for a very broad multi-temporal sequence, and taking advantage of both the aerial rapid mapping technologies already presented, and the appropriate homographic technique for the assignment of the spatial reference to historical documents.

Giulia Sammartano, dottore di ricerca in Beni architettonici e paesaggistici, assegnista in Geomatica presso il Politecnico di Torino, DAD
giulia.sammartano@polito.it

Nannina Spanò, professore associato di Geomatica, Politecnico di Torino, DAD
antonia.spano@polito.it

Alessia Rosignuolo, laureata magistrale in Architettura per il Restauro e la valorizzazione del patrimonio, Politecnico di Torino
alessia_ro@hotmail.it

1. La documentazione multi-temporale

La multi-temporalità nella documentazione dei fenomeni nel caso di edifici appartenenti al patrimonio storico costruito si dimostra sempre una possibilità importante non solo nella fase di conoscenza ma soprattutto nei processi di analisi e interpretazione dei comportamenti, specialmente nel caso del danno nei comportamenti sismici dell'edificio. Per questo le tecniche della Geomatica offrono strumenti integrati che permettono la correlazione di dati 3D metrici e di varia natura appartenenti a finestre temporali distinte, non solo per la pianificazione di un monitoraggio in tempi recenti ma anche per la correlazione di dati di epoche passate. Le ricerche che hanno beneficiato maggiormente dell'impiego di dati storici sono sicuramente le applicazioni nel campo delle immagini terrestri d'archivio per la documentazione[1], l'analisi[2], la ricostruzione[3] e il restauro[4], nel campo della cartografia storica[5], e delle foto aeree storiche[6]. L'impostazione

di sistemi di riferimento condivisi tramite il controllo dei metodi topografici e l'uso rigoroso di coordinate 3D accurate, infatti, è sempre diretta anche verso questi scopi.

2. Creazione di un archivio 3D di dati storici e recenti per la chiesa di Sant'Agostino

Spesso, nel caso di un'emergenza sismica, la necessità è quella di ricostruire un quadro formale precedente l'evento per le valutazioni e quantificazioni dei danni avvenuti, e ci si affida a documentazione recente se già esistente per il cosiddetto *tempo zero*. In mancanza di ciò si può far ricorso a interpretazioni di rilievi del passato, spesso sotto forma di immagini o documenti storici che devono subire processi di attenta digitalizzazione[7]. In questo caso il problema metrico però non è da sottovalutare e, proprio nel caso di documenti d'archivio, è possibile attuare processi di controllo metrico delle immagini (disegni o fotografie d'archivio) per trasformarle in fotopiani in scala, ovvero proiezioni ortogonali misurabili dell'oggetto rappresentato[8]. La gestione metrica della geometria 2D e 3D, grazie all'impiego di metodi integrati, offre quindi la possibilità di relazionare spazialmente informazioni multi-temporali di diversa natura, riferite sia all'esterno che all'interno dell'edificio, ancorché a scale e accuratezze differenti in riferimento alle fonti consultate[9].

Nel caso qui presentato (Figura 1) della chiesa di Sant'Agostino ad Amatrice, l'edificio e tutta la sua storia stratificata, ha richiesto particolare attenzione nella documentazione dei crolli diffusi e del quadro fessurativo, finalizzati alla valutazione e interpretazione del danno sismico nella sua complessità e consequenzialità nel tempo[10].

Da un lato è importante evidenziare che l'attività continuativa del team DIRECT sul campo, come già descritto, ha permesso di ottenere, tramite le tre campagne di rilievo metrico 3D (settembre 2016, dicembre 2016, gennaio 2017) (Figura 2a) a seguito dei principali eventi simici (24 agosto 2016, 26-30 ottobre 2016, 18 gennaio 2017), una documentazione multi-temporale continua e completa. L'esito della documentazione integrata ha consentito di derivare nuvole di punti 3D da immagini da drone (Figura 2b) e da queste, di calcolare modelli 3D con superfici continue ad alta risoluzione (Figura 2c), dalle quali infine poter realizzare ortofoto ad alto contenuto metrico e radiometrico[11].

Nello specifico, i fronti su cui si è concentrato l'interesse, dovuto alla localizzazione prevalente delle informazioni, sono stati il fronte principale, il fronte sud-est e il fronte nord-ovest affacciato sulla corte interna, insieme al campanile[12].

Su altro fronte, è stato funzionale coordinare e integrare la ricerca di documentazione d'archivio, che ha condotto a poter disporre di otto disegni di rilievo diretto dello stato di fatto della chiesa di Sant'Agostino risalente al 1980, dopo il terremoto di Norcia e della Valnerina del 1979, in disponibilità della Soprintendenza archeologia, belle arti e paesaggio della provincia di Rieti. Benché il rilievo, il disegno e la conservazione dei fogli non siano di alta qualità, il potenziale rilevante di questo materiale risiede nel contenuto informativo che consiste nella mappatura delle lesioni risalenti alla situazione post 1979, per poterle confrontare con quelle subite nell'evento ultimo, che ha segnato il momento irreversibile nella storia della chiesa.

I documenti sono pervenuti in formato di immagine fotografica realizzata sui disegni tecnici eseguiti a mano e a colori su carta, con difetti dovuti all'età e alla piegatura dei fogli (Figura 3). Il processo di raddrizzamento metrico analitico, eseguito per ogni documento impiegando il software open-source RDF e le misure di coordinate ricavate dai modelli di punti recenti, ha permesso di eliminare la deformazione prospettica dovuta alla fotografia, generando degli ortopiani in scala metricamente controllati e da cui è stato poi possibile ottenere misure accurate per una scala assimilabile a 1:100-1:200.

Nel processo di trasformazione omografica e ri-campionamento dell'immagine, l'uso di punti di controllo di

Figura 1. (a) Un'illustrazione di Edward Lear del 1884 raffigurante la chiesa di Sant'Agostino ad Amatrice; (b) una fotografia della chiesa prima delle scosse del 2016 (https://closer.colasantiaste.com).

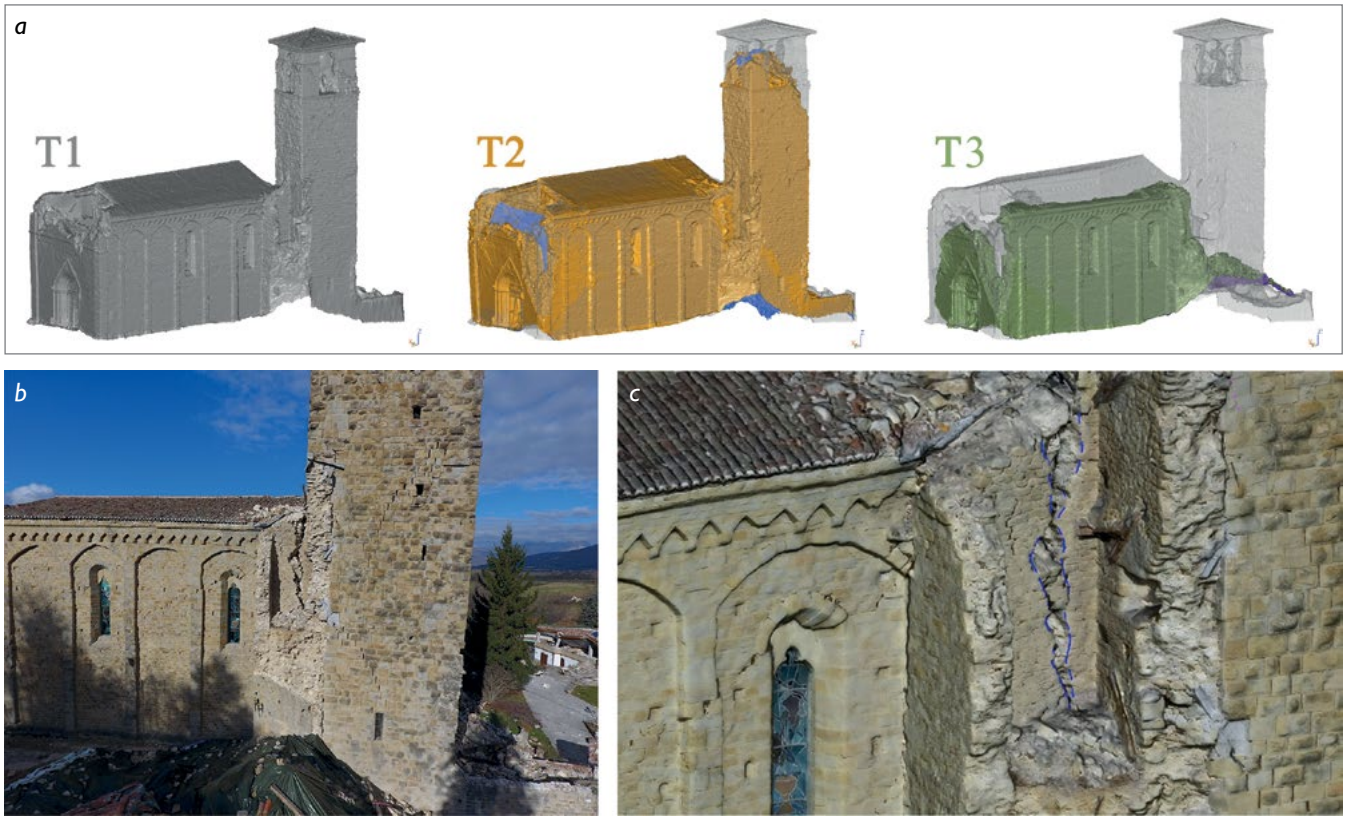


Figura 2. (a) Visualizzazione dei modelli 3D riferiti ai tre tempi relativi agli eventi sismici; (b) ispezione dei danni da immagine da drone; (c) ispezione sul modello 3D.

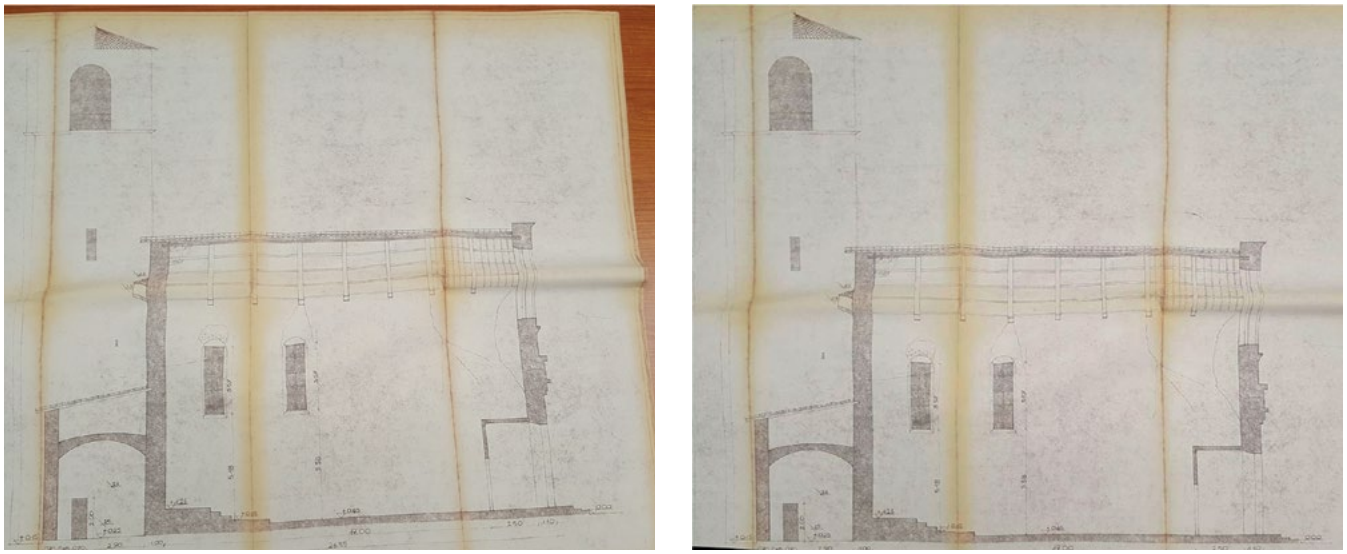


Figura 3. I disegni dei rilievi del 1989 prima e dopo il raddrizzamento metrico.

coordinate note appartenenti al sistema di riferimento corrente, impostato in concomitanza con i rilievi d'emergenza 2016, ha permesso di gestire i prodotti derivati del raddrizzamento nello stesso spazio 3D, consentendo così di mettere facilmente in relazione lo stato attuale dei modelli digitali con i suddetti documenti storici bidimensionali.
Seguendo lo stesso principio si è operato anche sulla foto storica datata a inizio '900 nella quale è visibile la chiesa nella condizione precedente la sopraelevazione della facciata con l'inserimento del rosone, dove erano ancora chiaramente visibili i segni di scosse sismiche del passato[13].
Grazie all'integrazione dei dati sopra descritti (Figura 4) è stato possibile portare avanti un processo di documentazione e analisi dell'edificio, a partire dall'ipotesi di un cosiddetto *tempo zero (T0)*[14] (Figura 5), attraverso le tre scosse e i progressivi collassi, accompagnata dalla mappatura dei danni visibili dalla documentazione storica a quella fotogrammetrica 2016-2017.

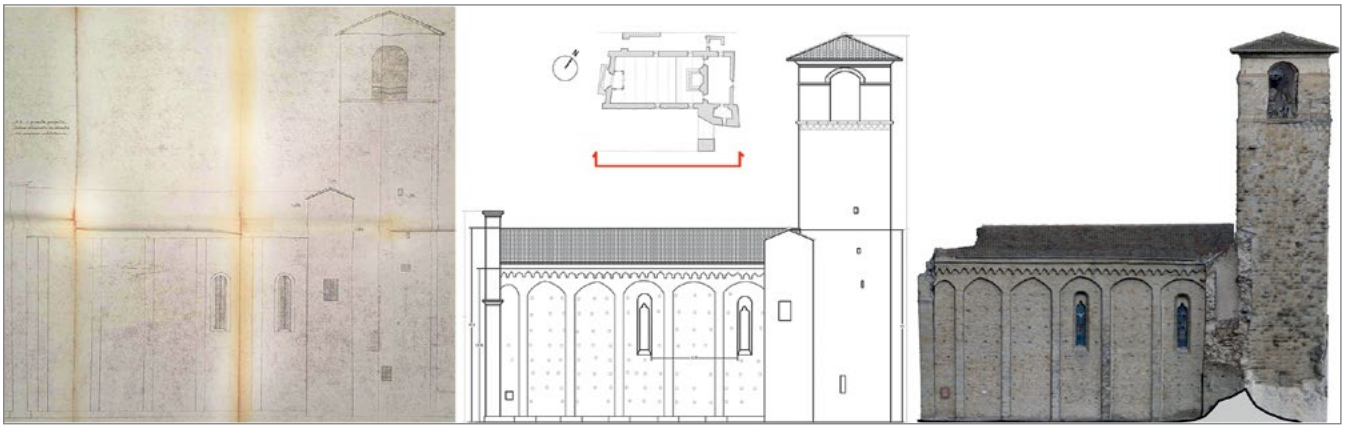


Figura 4. Esempio di integrazione delle informazioni per il fronte sud-est: il rilievo del 1989 (sinistra); la ricostruzione analitica del T0; ortofoto da rilievo metrico 3D.

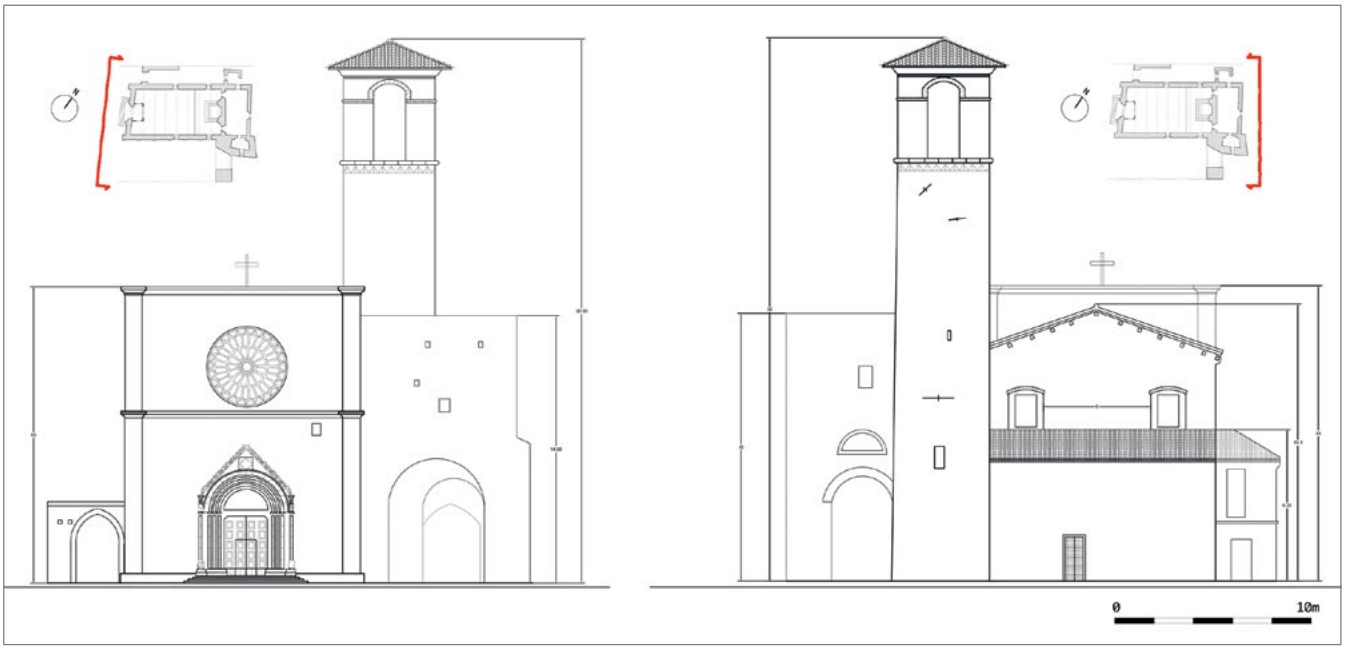


Figura 5. La ricostruzione analitica della chiesa al T0: fronte principale e nord-est.

Tuttavia, nel processo di costruzione dell'ipotesi della geometria dell'oggetto pre-sisma tramite le misure rilevate delle porzioni di fabbrica ancora erette e quelle dedotte dagli stralci di documentazione storica, si sono incontrati non poche incertezze relative a incongruenze delle misure (Figura 6).

Queste sono state, ad esempio: le dimensioni del campanile, raffigurato nei rilievi del 1980 più basso e tozzo rispetto all'esistente nel 2016; il colmo del tetto, posizionato a una quota più alta rispetto all'allora stato di fatto; la posizione in quota e la distanza reciproca, ridotta rispetto alla realtà, delle finestre oblunghe trilobate sui lati est e ovest dell'aula; la distanza tra il rosone centrale della facciata e la punta sommitale del portale in marmo tardo gotico.

A partire dal *tempo zero*, gli eventi distruttivi che hanno avuto origine il 24 agosto 2016 hanno causato progressive lesioni, alcune gravi e profonde che hanno portato al collasso di elementi architettonici rilevanti.

Con il primo evento, la chiesa, rappresentata dal modello T1 riferito all'evento di agosto 2016, ha subito un parziale crollo del fronte principale in corrispondenza della sopraelevazione recente che non era immorsata e che ha trascinato nel suo ribaltamento una prima porzione della copertura. La porta Carbonara, adiacente al fronte sud-est, è crollata totalmente, così come parte delle strutture sul fronte nord.

In seguito agli eventi di ottobre, il modello T2 (Figura 7) documentato con i rilievi fotogrammetrici di dicembre, riporta i danni consistenti delle strutture portanti della chiesa. Infatti, oltre a un peggioramento del crollo del fronte principale con distaccamento di esso dall'innesto con le murature laterali dell'aula, anche il campanile ha riportato un grave crollo della parte sommitale, con una serie di fessurazioni distribuite su tutte le pareti dalle quali si è già assistito al distacco diffuso di conci in pietra. I fronti nord e ovest hanno subito grandi collassi di porzioni di muratura e sul fronte est si è manifestata una fessurazione a taglio tra le finestre oblunghe.

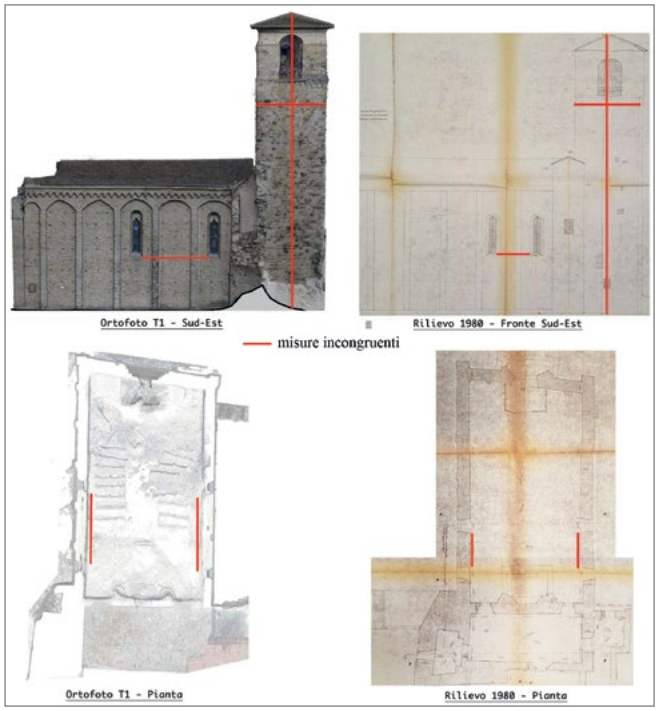


Figura 5. La ricostruzione analitica della chiesa al T0: fronte principale e nord-est.

Con le forti scosse di gennaio 2017 la struttura già profondamente vulnerabile ha riportato i crolli più gravi e decisivi, documentati nel modello T3, relativo alla missione di febbraio 2017. Al completo collasso del campanile e della copertura in capriate di legno e coppi, si è unito il crollo di quasi tutta la parete ovest e l'aggravamento dei crolli del fronte principale che ha coinvolto ora gravemente anche il portale gotico.
Il fronte est è tutt'ora ancora eretto, e sottoposto a consolidamento d'emergenza.
L'approfondimento di analisi e corrispondente esito iconografico che presentiamo tramite due esempi nella figura 8, si riferisce invece specificatamente all'analisi multi- temporale delle lesioni dedotte dalle immagini storiche e accostate agli effetti degli eventi 2016-2017, realizzati per ogni singolo fronte della chiesa[15].

Considerazioni conclusive

A partire dalla documentazione disponibile, si è sempre stati in grado sostanzialmente di porre in diretta relazione gli elementi di vulnerabilità riscontrati, analizzati e discussi nel gruppo di lavoro interdisciplinare della task force,

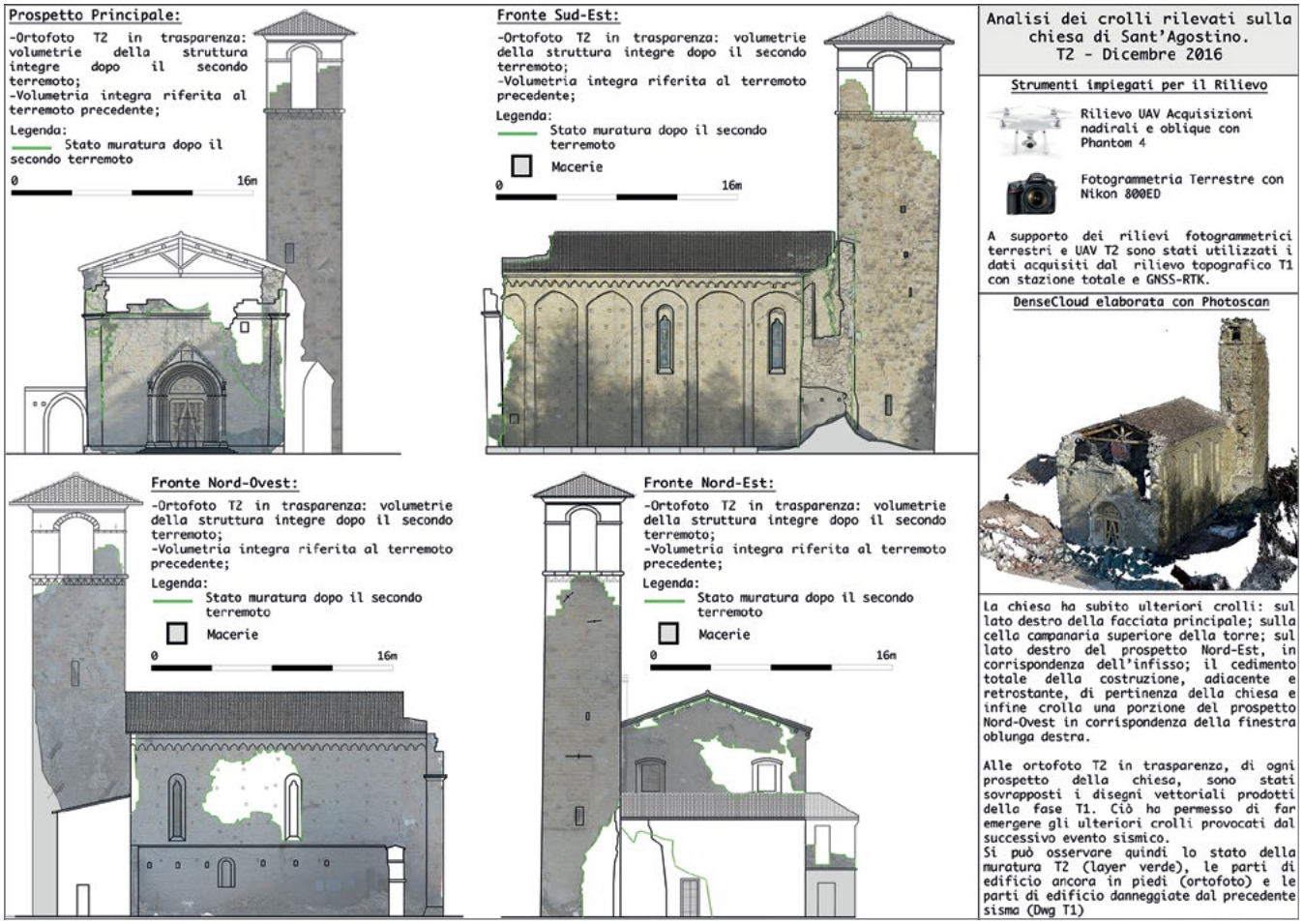


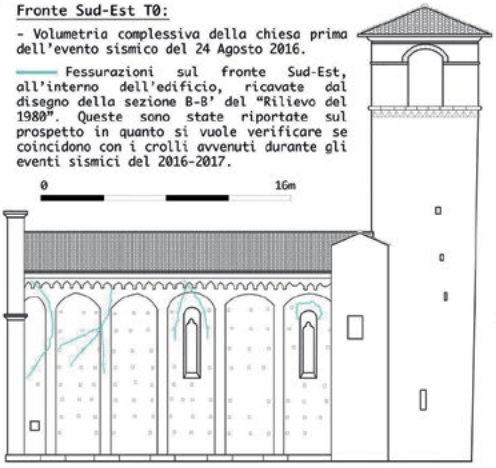
Figura 7. Documentazione della situazione della chiesa al tempo T2 (dati di dicembre 2016) dei quattro fronti in un confronto sincronico, con relazione al modello 3D a supporto dell'analisi e mappatura del danno.
Nella pagina seguente: Figura 8. Analisi multi-temporale indirizzata su ciascun fronte. Nelle tavole il fronte sud-est e il fronte nord-est nelle corrispondenti letture diacroniche.

Fronte Sud-Est T0:

- Volumetria complessiva della chiesa prima dell'evento sismico del 24 Agosto 2016.

Fessurazioni sul fronte Sud-Est, all'interno dell'edificio, ricavate dal disegno della sezione B-B' del "Rilievo del 1980". Queste sono state riportate sul prospetto in quanto si vuole verificare se coincidono con i crolli avvenuti durante gli eventi sismici del 2016-2017.

0 16m



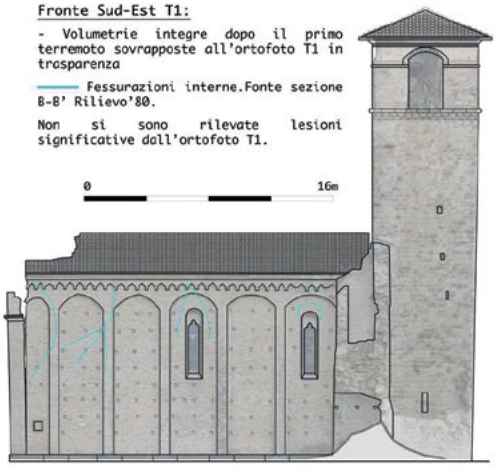
Fronte Sud-Est T1:

- Volumetrie integre dopo il primo terremoto sovrapposte all'ortofoto T1 in trasparenza

Fessurazioni interne.Fonte sezione B-B' Rilievo'80.

Non si sono rilevate lesioni significative dall'ortofoto T1.

0 16m



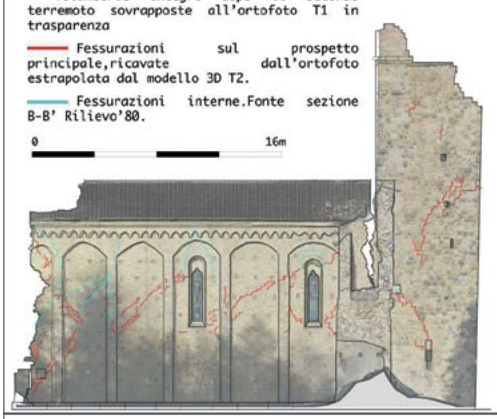
Fronte Sud-Est T2:

- Volumetrie integre dopo il secondo terremoto sovrapposte all'ortofoto T1 in trasparenza

Fessurazioni sul prospetto principale,ricavate dall'ortofoto estrapolata dal modello 3D T2.

Fessurazioni interne.Fonte sezione B-B' Rilievo'80.

0 16m



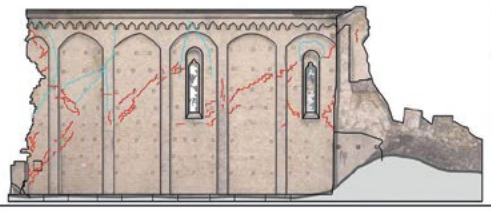
Fronte Sud-Est T3:

- Volumetrie integre dopo il terzo terremoto sovrapposte all'ortofoto T1 in trasparenza

Fessurazioni sul prospetto principale,ricavate dall'ortofoto estrapolata dal modello 3D T3.

Fessurazioni interne.Fonte sezione B-B' Rilievo'80.

0 16m



Analisi delle lesioni rilevate sulla chiesa di Sant'Agostino: Fronte Sud-Est

Il Fronte Sud-Est, durante il susseguirsi dei terremoti, ha subito fessurazioni significative, sulla muratura, che sono state confrontate con lesioni presenti sul fronte prima dell'evento sismico del 2016-2017. Quest'analisi permette di verificare se le lesioni evidenziate sono i presupposti iniziali del ripetuto cedimento strutturale.

Documentazione di Partenza

T0 PRE-SISMA

T1 SETTEMBRE 2016

T2 DICEMBRE 2016

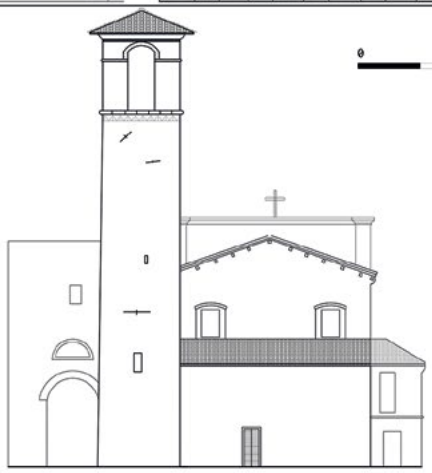
T3 FEBBRAIO 2016

Fronte Nord-Est T0:

- Volumetria complessiva della chiesa prima dell'evento sismico del 24 Agosto 2016.

Non sono stati reperiti documenti che evidenziassero lesioni al momento T0. Viene riportato la volumetrua complessiva come confronto con le sottostanti analisi sulle lesioni rilevate dopo i singoli eventi sismici registrati tra il 2016-2017.

0 16m



Fronte Nord-Est T1:

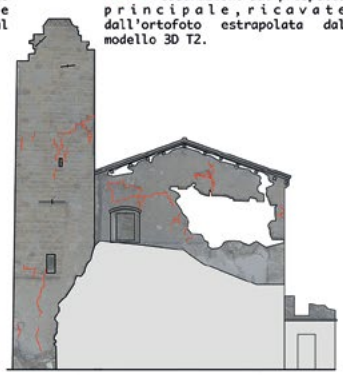
- Volumetrie integre dopo il primo terremoto sovrapposte all'ortofoto T1 in trasparenza

Fessurazioni sul prospetto principale,ricavate dall'ortofoto estrapolata dal modello 3D T1.

Fronte Nord-Est T2:

- Volumetrie integre dopo il secondo terremoto sovrapposte all'ortofoto T1 in trasparenza

Fessurazioni sul prospetto principale,ricavate dall'ortofoto estrapolata dal modello 3D T2.



Fronte Nord-Est T3:

- Volumetrie integre dopo il terzo terremoto sovrapposte all'ortofoto T1 in trasparenza

Fessurazioni sul prospetto principale,ricavate dall'ortofoto estrapolata dal modello 3D T3.

Analisi delle lesioni rilevate sulla chiesa di Sant'Agostino: Fronte Nord-Est

Il Fronte Nord-Est, durante il susseguirsi dei terremoti, ha subito fessurazioni importanti. Non sono stati reperiti documenti o riferimenti fotografici che evidenziasseri lesioni precedenti al terremoto 2016-2017.
Quest'analisi permette di verificare se le lesioni evidenziate sono i presupposti iniziali del crollo quasi totale del fronte.

Documentazione di Partenza

T1 SETTEMBRE 2016

T2 DICEMBRE 2016

T3 FEBBRAIO 2016

con i segni dei dissesti documentati nel tempo e condotti in un unico archivio di dati 3D di modelli tridimensionali con textures, ortofoto, nonché fotopiani di documenti storici dai quali sono state ricavate le digitalizzazioni dei danni del passato da confrontare metricamente con quelle recenti.

Proprio per questi motivi, la distribuzione delle fessurazioni sui lati delle murature d'ambito dell'aula, sia all'esterno che nei corrispettivi andamenti interni, insieme alle modalità di crollo della copertura sulle pareti stesse, hanno potuto consentire il ragionamento su vantaggi e svantaggi prodotti dai consolidamenti precedenti delle murature e nei nodi tra le stesse e l'innesto delle coperture.

Lo sforzo di documentazione metrica estensiva dello stato di fatto e dei danni progressivi del terremoto di Amatrice sulla chiesa di Sant'Agostino ha sicuramente contribuito attivamente all'analisi e alla comprensione globale del comportamento sismico della struttura e della sua profonda vulnerabilità. Ha altresì fatto emergere l'interesse e le potenzialità dell'utilizzo di documentazione metrica accurata e multi-temporale, benché proveniente da fonti diverse. In particolar modo, il vantaggio di questi metodi della Geomatica risiede nella possibilità di correlare, come in questo caso, mappature del danno di eventi storici in un modello 3D accurato sia interno che esterno dello stato attuale o, in generale, di un momento successivo documentato con tecniche avanzate digitali, per contribuire all'interpretazione del ruolo di danni pregressi come possibile premessa ai comportamenti sismici futuri.

Note

[1] Gabriele Bitelli, Valentino Alena Girelli, Michele Marziali, Antonio Zanutta, *Use of historical images for the documentation and the metrical study of Cultural Heritage by means of digital photogrammetric techniques*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XXXVI-5/C53, 2007, pp. 141-146.

[2] José Luis Lerma, Miriam Cabrelles, Cristina Portalés, *Multitemporal thermal analysis to detect moisture on a building*, in «Construction and Building Materials», 25(5), 2011, pp. 2190-2197.

[3] Albert Wiedemann, Matthias Hemmleb, Jörg Albertz. *Reconstruction of historical buildings based on images from the Meydenbauer archives*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 33(B5/2; PART 5), 2000, pp. 887-893.

[4] Cristiana Beltrami, Donatella Cavezzali, Filiberto Chiabrando, Antonio Iaccarino, Giacomo Patrucco, Fulvio Rinaudo, *3D digital and physical reconstruction of a collapsed dome using SfM techniques from historical images*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W11(2/W11), 2019, pp. 217-224.

[5] Filippo Brandolini, Giacomo Patrucco, *Structure-from-Motion (SFM) Photogrammetry as a Non-Invasive Methodology to Digitalize Historical Documents: A Highly Flexible and Low-Cost Approach?*, in «Heritage», 2(3), 2019, pp. 2124-2136.

[6] Erica Nocerino, Fabio Menna, Fabio Remondino, *Multi-temporal analysis of landscapes and urban areas*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XXXIX-B4, 2012, pp. 85-90.

[7] La digitalizzazione e l'analisi dei disegni d'archivio della Soprintendenza è stata oggetto di: Alessia Rosignuolo, *Il ruolo della Geomatica per supportare le situazioni di emergenza post eventi sismici dei beni architettonici. Analisi multi-temporale della chiesa di Sant'Agostino ad Amatrice*, tesi di laurea in Architettura per il Restauro e la valorizzazione del patrimonio, Politecnico di Torino, relatore Antonia Spanò, dicembre 2018.

[8] Filippo Brandolini, *Structure-from-Motion*... cit., p. 2129.

[9] Silvia Beltramo, Elisabetta Donadio, Antonia Spanò, *Stratigraphic Analyses, Historical Evidences, and 3D Documentation Tools: Deepening Built Heritage – New Researches for Historical Building Sites in Staffarda*, in C. Inglese, A. Ippolito (eds.), *Analysis, Conservation, and Restoration of Tangible and Intangible Cultural Heritage*, IGI Global, Hershey, PA 2019, pp. 273-301.

[10] Cfr. in questo volume il contributo a p. 147, e inoltre: Alessandro Grazzini, Filiberto Chiabrando, Sebastiano Foti, Giulia Sammartano, Antonia Spanò, *A Multidisciplinary Study on the Seismic Vulnerability of St. Agostino Church in Amatrice following the 2016 Seismic Sequence*, in «International Journal of Architectural Heritage», 0(0), 2019, pp. 1-18.

[11] Giulia Sammartano, *Suitability of 3D dense models from rapid mapping strategies for Cultural Heritage documentation and conservation. Validation of metric and non-metric information extraction from integrated solutions*, tesi di dottorato di ricerca in Beni architettonici e paesaggistici, Politecnico di Torino, XXX ciclo (2018), tutors Antonia Spanò, Filiberto Chiabrando.

[12] Giulia Sammartano, *Suitability of 3D dense models*... cit.

[13] Alessandro Grazzini, *A Multidisciplinary Study*... cit.

[14] Alessia Rosignuolo, *Il ruolo*... cit.

[15] *Ivi*.

BY-NC-SA